

**COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE**

**SESSION DE 1939.**

---

**PROCÈS-VERBAUX DES SÉANCES,**

**RAPPORT ET ANNEXES.**



---

**PRÉSIDENT**

du Comité international des Poids et Mesures :

M. LE SÉNATEUR V. VOLTERRA

---

**LISTE DES MEMBRES**

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE.

---

*Président :*

M. le Prof. D<sup>r</sup> W. H. KEESOM, Directeur du Kamerlingh Onnes Laboratorium der Rijks-Universiteit, *Leiden*.

*Membres et experts :*

Pour la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, *Berlin* :

M. le Prof. D<sup>r</sup> F. HENNING, Directeur de l'Abteilung III de la Reichsanstalt.

Pour le National Bureau of Standards, *Washington* :

M. E. C. CRITTENDEN, Directeur adjoint du National Bureau of Standards.

Pour le National Physical Laboratory, *Teddington* :

M. J. E. SEARS, Superintendant de la Section de Métrologie du National Physical Laboratory. *Expert* :

M. J. A. HALL, Membre de ce Laboratoire.

Pour le Bureau des Longitudes, *Paris* : M. G. RIBAUD, Professeur de Physique à la Sorbonne. *Expert* : M. G. A. BOUTRY, Directeur du Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers.

Pour l'institution du Japon. *Observateur* : M. I. HAYASHI, Ingénieur, Bureau du Ministère des Communications du Japon à Paris.

Pour l'Institut de Métrologie de l'U. R. S. S., *Leningrad* : M. le Prof. G. KONDRATIEV, Chef du Laboratoire thermométrique de l'Institut de Métrologie.

M. A. PÉRARD, Directeur du Bureau international des Poids et Mesures, *Sèvres*.

*Invités :*

M. H. ABRAHAM, Secrétaire de l'Union internationale de Physique pure et appliquée, 45, rue d'Ulm, *Paris* (5<sup>e</sup>).

M. CH. VOLET, Adjoint du Bureau international des Poids et Mesures, *Sèvres*.

MM. M. ROUX, J. TERRIEN et N. CABRERA, Assistants du Bureau international des Poids et Mesures.



COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE.

---

SESSION DE 1939.

---

PROCÈS-VERBAL

DE LA PREMIÈRE SÉANCE,

TENUE AU PAVILLON DE BRETEUIL,

le mardi 11 juillet 1939.

PRÉSIDENCE DE M. LE PROF. D<sup>r</sup> W. H. KEESOM.

---

Sont présents : MM. B. CABRERA et FABRY, membres du Comité international des Poids et Mesures.

MM. CRITTENDEN, HAYASHI (observateur), HENNING, KONDRATIEV, PÉRARD, RIBAUD, SEARS, BOUTRY, HALL, membres du Comité consultatif et experts.

Assistent à la séance : MM. ABRAHAM, VOLET, ROUX, TERRIEN, N. CABRERA, invités.

La séance est ouverte à 15<sup>h</sup> 10<sup>m</sup>.

M. le PRÉSIDENT donne la parole à M. CABRERA qui fait part au Comité consultatif des vœux adressés par M. Volterra président du Comité international, malheureusement empêché par la maladie d'assister à cette session. Il souhaite la bienvenue aux membres du Comité consultatif de Thermométrie qui se réunit aujourd'hui pour la première fois; puis il rappelle l'origine de ce Comité et le but de ses travaux.

M. PÉRARD propose de nommer M. Volet comme secrétaire du Comité. Puis il montre l'intérêt qu'il y aurait à ce que les fonctions de rapporteur fussent remplies par un membre du Comité international des Poids et Mesures; il propose en conséquence de nommer M. Sears qui veut bien accepter. Ces nominations sont approuvées à l'unanimité.

M. PÉRARD rappelle que le règlement du Comité prévoit que celui-ci sera formé des représentants des six grands Laboratoires nationaux et de quatre spécialistes nommés par le Comité international après l'avis du Comité consultatif lui-même une fois constitué. Le Japon n'a pas d'organisme spécialisé dans la mesure des températures; son ambassade a délégué M. Hayashi pour assister aux séances en tant qu'observateur. Les quatre spécialistes n'ayant pas été jusqu'ici désignés, M. PÉRARD demande qu'une liste soit établie pour être proposée au Comité international. Il signale que parmi les pays non encore représentés, l'Italie tient la première place par le chiffre de sa population et que, dans ce pays, M. Pochettino est très vivement recommandé par MM. Bordoni et Lombardi. Comme spécialiste, M. Swietoslowski, qui est président de la Commission internationale des données physico-chimiques, de nationalité polonaise, peut aussi être proposé. En Belgique, M. Timmermans, secrétaire de la même Commission pourrait aussi apporter une contribution utile aux travaux du Comité. M. Pérard signale enfin que M. Nagaoka a recommandé M. Kinoshita comme spécialiste japonais.

M. le PRÉSIDENT propose, à la demande de M. Cabrera, la candidature de M. Palacios, physicien espagnol.

Après un échange de vues sur les titres des membres proposés et sur l'opportunité de leur nomination éventuelle, le Comité se range à l'avis de ne nommer que trois spécialistes.

Puis, sur une demande de M. PÉRARD, le Comité reconnaît que l'activité politique d'un savant ne saurait faire obstacle à sa nomination.

Il est finalement décidé, à l'unanimité, de proposer au Comité international, la nomination de MM. Pochettino, Swietoslowski et Timmermans.

#### THERMOMÉTRIE DES BASSES TEMPÉRATURES.

M. le PRÉSIDENT indique que le Comité de Thermométrie de l'Institut International du Froid s'est occupé, comme premier point de son programme, de la position du point de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin. Le Comité a essayé de déterminer un nombre moyen, mais des difficultés provenaient de deux côtés : d'un côté il y avait des déterminations récentes d'origine japonaise dont on ne pouvait pas regarder la discussion comme définitive ; d'un autre côté M. Beattie du Massachusetts Institute of Technology annonçait qu'il était sur le point de terminer une recherche très précise, dont le résultat provisoire indiquait un nombre sensiblement plus haut que les nombres dérivés des autres recherches qui viennent en considération.

Le Comité du Froid se propose de reprendre la question et de présenter à la prochaine session un rapport au Comité international des Poids et Mesures ; mais le Président pense qu'il serait désirable de déterminer tout de suite une valeur à adopter provisoirement.

Il indique les nombres suivants comme susceptibles de fournir les bases de la discussion :

273,16.....	Berlin
273,144.....	Leyde
273,16.....	Roebuck
273,15.....	Kinoshita et Oishi
(273,16 à 273,17).....	Beattie

M. le PRÉSIDENT déclare avoir demandé à M. Beattie

s'il pouvait lui envoyer avant la présente séance un résultat définitif; par une lettre du 2 juin, M. Beattie a déclaré ne pouvoir encore donner un résultat précis. M. le Président propose donc d'adopter la valeur 273,15.

M. PÉRARD fait remarquer la discordance entre le résultat japonais tel qu'il est cité par M. Keesom et celui donné dans le Rapport du National Bureau of Standards.

M. le PRÉSIDENT cite une lettre de décembre 1938 de M. Kinoshita, où celui-ci déclare que ses dernières expériences lui donnent 273,15.

M. HALL demande si les travaux de Kinoshita sont terminés.

M. le PRÉSIDENT répond négativement; les seuls travaux vraiment terminés sont ceux de Leyde et de Berlin. Le travail de Roebuck n'est pas indépendant des précédents; car dans ses calculs à partir de l'effet Joule-Kelvin il a pris les coefficients d'expansion déterminés ailleurs.

M. HENNING remarque qu'il semble impossible d'atteindre le centième de degré, il ne pense pas, d'après les expériences faites à Berlin, qu'on puisse avoir mieux que deux ou trois centièmes; la moyenne des mesures de plusieurs années donne à Berlin 273,16; mais il est prêt à adopter 273,15, si tout le monde est d'accord.

M. le PRÉSIDENT propose la valeur

$$273,15 \pm 0,02;$$

mais estime que cette valeur doit être exacte à un centième de degré près.

M. CRITTENDEN pense comme M. Henning que 273,16 serait préférable; mais est d'accord pour adopter 273,15.

M. le PRÉSIDENT propose de prendre une résolution à porter comme amendement à la proposition du N. B. S.

M. PÉRARD lit le projet de résolution suivant :

« Le Comité consultatif de Thermométrie estime que, d'après  
« les expériences actuellement terminées, la position la plus  
« probable du point de fusion de la glace dans l'Échelle Kelvin  
« est  $273^{\circ},15$  avec une incertitude de  $\pm 0,02$  degré.

« Au cas où l'on voudrait arrondir ce nombre, il conviendrait  
« de prendre de préférence  $273^{\circ},2$ . »

M. KONDRATIEV objecte que la résolution donne la préférence du signe + et suggère de prendre alors  $273,16$ .

M. BOUTRY pense qu'il faut comprendre que la vraie valeur est entre  $273,15$  et  $273,16$ .

M. FABRY ne voit pas la nécessité de recommander une valeur arrondie.

Le Comité est unanime à proposer la suppression de la deuxième phrase. La résolution est donc adoptée sous la forme suivante :

#### RÉSOLUTION I.

*Le Comité consultatif de Thermométrie estime que, d'après les expériences actuellement terminées, la position la plus probable du point de fusion de la glace dans l'Échelle Kelvin est  $273^{\circ},15$  avec une incertitude de  $\pm 0,02$  degré.*

#### APERÇU DE L'ÉTAT DE LA QUESTION DE L'ÉCHELLE THERMOMÉTRIQUE AU-DESSOUS DE $-190^{\circ}$ C.

M. le PRÉSIDENT rappelle que, dans le domaine des températures allant de  $-190$  à  $-259^{\circ}$  C, le thermomètre à résistance de platine a été l'objet d'examens très minutieux

à la Physikalisch-Technische Reichsanstalt et au Laboratoire Kamerlingh Onnes.

Une prescription comme celle qui définit l'échelle thermométrique internationale pour les températures plus hautes ne peut pas encore être proposée.

On a l'intention d'étudier le thermomètre en or, pour voir si la résistance de l'or ne serait pas, dans cette région, une fonction de la température moins compliquée que celle du platine.

La base de la thermométrie dans cette région de température est donc encore le thermomètre à hélium.

M. BOUTRY demande si l'on peut envisager l'utilisation de thermocouples pour les mesures des basses températures.

M. le PRÉSIDENT dit que l'on ne peut y songer pour constituer un thermomètre étalon.

PROPOSITION CONCERNANT LA DÉFINITION  
DE L'ÉCHELLE THERMODYNAMIQUE ABSOLUE.

M. CRITTENDEN présente une proposition émanant du « Comité des Échelles des basses températures du National Research Council (États-Unis) », tendant à modifier la définition de l'échelle thermodynamique absolue, en fixant définitivement la température de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin (Annexe T 1, p. T 33). Il précise que cette proposition n'est présentée que dans le but de provoquer une discussion préliminaire, et qu'elle est encore en étude au National Bureau of Standards; celui-ci se borne à la transmettre.

M. PÉRARD appelle l'attention sur l'inconvénient qu'il pourrait y avoir à créer une incertitude sur la température de définition des calibres et sur les coefficients de

dilatation des étalons de précision; en conséquence, le Bureau international des Poids et Mesures serait opposé à la modification de l'échelle thermodynamique actuelle.

M. le PRÉSIDENT serait d'accord sur le principe de la proposition, qui serait commode pour les mesures des basses températures, mais approuve M. Boutry qui l'estime prématurée, dans l'état actuel de la précision des mesures.

M. ABRAHAM demande au Comité s'il pense que l'on peut dépasser le centième de degré comme précision dans la mesure absolue de la température d'un thermostat parfait, cette température étant voisine, par exemple, de 50° C.

M. PÉRARD estime que si cette température est la température ambiante du laboratoire et si le corps dont on prend la température est un liquide, en particulier de l'eau, on peut espérer avoir 0,003 degré.

M. BOUTRY pense que l'erreur est comprise entre deux et trois millièmes, plus près de deux que de trois.

M. PÉRARD fait remarquer qu'une erreur de 0,02 degré sur la position du point de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin ne se traduirait pas dans l'échelle centigrade par une erreur égale sur la température voisine de 50° C.

M. BOUTRY demande quelle est la précision actuelle des mesures de la température d'ébullition de l'eau.

M. HALL indique que les mesures concordent entre elles à trois ou quatre millièmes de degré près.

M. le PRÉSIDENT propose aux membres du Comité de réfléchir à la proposition du Comité américain pour pouvoir y revenir dans une prochaine session.

L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE.

M. le PRÉSIDENT signale avec éloge, parmi les documents reçus, le *Projet d'échelle internationale* (1939) établi par le National Bureau of Standards (voir Annexe n° T 2 p. T 60). Il propose de suivre pas à pas ce texte pour l'étude de cette question.

M. CRITTENDEN suggère de prendre de préférence pour base le texte de 1933 en raison du grand nombre de points de détail modifiés dans le rapport du Bureau of Standards.

M. le PRÉSIDENT estime que cela est inutile étant donné qu'il n'y a aucune objection fondamentale contre le rapport en question et propose de commencer la discussion par la deuxième partie.

Il demande s'il n'y aurait pas lieu d'établir une distinction entre les points 0° et 100°, et les autres points fixes; les premiers seraient appelés points fixes fondamentaux et les autres seraient les points fixes primaires.

M. PÉRARD propose de supprimer les zéros après 0° et 100° pour indiquer que ces nombres ne proviennent pas de mesures.

Ces modifications sont approuvées, et M. le PRÉSIDENT passe alors à la discussion des valeurs numériques des points fixes primaires; il suggère pour le point d'ébullition de l'oxygène, d'après les mesures faites à Leyde, la valeur — 182,98 et demande si la Physikalisch-Technische Reichsanstalt pourrait être d'accord.

M. HENNING propose de garder la valeur actuelle.

M. le PRÉSIDENT retire sa proposition et M. Henning parle du point triple de l'eau comme point fondamental, celui-ci pouvant être physiquement mieux défini que le point de la glace.

M. PÉRARD signale qu'un de ses collaborateurs a été frappé, à Berlin, de la précision avec laquelle ce point triple pouvait être reproduit, et demande à M. Henning s'il propose au Comité de discuter l'adoption immédiate de sa proposition.

M. HENNING indique qu'il demande seulement que des études sur ce sujet soient faites dans les autres laboratoires.

M. BOUTRY remarque que l'eau utilisée pour la détermination du point zéro doit être saturée d'air; il demande à M. Henning si le fait d'avoir à utiliser de l'eau parfaitement pure n'introduirait pas une difficulté.

M. VOLET pense que l'emploi d'eau pure conduit à des conditions mieux définies. Dans les déterminations du point zéro on utilise de l'eau saturée d'air; mais l'eau de fusion de la glace est sans air et le mélange est mal défini.

M. le PRÉSIDENT met en discussion la valeur du point de fusion de l'argent  $960^{\circ},7$ , proposée dans le rapport.

M. CRITTENDEN indique que cette modification est liée au changement de la constante  $C_2$ .

M. le PRÉSIDENT propose donc au Comité de se prononcer sur l'adoption des paragraphes 1, 2 et 3, en réservant ce point. Le Comité adopte cette partie du texte.

M. PÉRARD suggère de renvoyer la phrase du paragraphe 4 « entre les points de bifurcation formés par la soudure du conducteur de courant et du conducteur de potentiel », au paragraphe 6 de la troisième partie.

M. HALL voudrait voir mentionner uniquement dans la définition le platine, sans qu'il soit question d'appareil, celui-ci étant décrit au paragraphe 6.

M. CRITTENDEN objecte qu'il faut faire intervenir le mode de construction; on peut faire un mauvais thermomètre avec du bon platine.

M. HALL retire sa proposition et M. PÉRARD lit la rédaction suivante :

a. « Du point de fusion de la glace au point de solidification de l'antimoine la température  $t$  est définie par la formule

$$R_t = R_0(1 + A t + B t^2),$$

« dans laquelle  $R_t$  est la résistance à la température  $t$  d'un thermomètre étalon à résistance de platine. »

M. KONDRATIEV objecte que la grosseur du conducteur de platine peut intervenir.

M. BOUTRY ne trouve pas l'objection exacte, en ce sens que la grosseur du conducteur n'intervient que par des phénomènes secondaires (contraintes mécaniques pour les fils fins, non-uniformité du courant et de la température pour une barre), que l'on peut rendre aussi petits que l'on veut en prenant beaucoup de soins.

M. PÉRARD précise qu'il faut toujours se reporter aux spécifications, et propose que ce point soit entendu expressément une fois pour toutes.

M. le PRÉSIDENT est d'accord avec le Bureau of Standards sur la nécessité d'exigences plus sévères dans la définition du platine du thermomètre; mais il propose de les mettre sous la forme de limites à imposer au rapport  $\frac{R_t}{R_0}$ .

M. HENNING remarque que les nouvelles exigences s'appliquent à la formule de Callendar qui n'est pas celle proposée; ce qui conduit à une certaine incohérence.

M. le PRÉSIDENT pense qu'il n'y a là qu'une question de forme.

M. HALL estime que la condition imposée à  $\frac{R_{100}}{R_0}$  est suffisante.

M. CRITTENDEN juge les nouvelles définitions nécessaires, si l'on veut conserver à la courbe des températures une courbure définie.

M. BOUTRY propose de conserver la simplicité d'utilisation du thermomètre en ne prenant que la condition portant sur  $\frac{R_{100}}{R_0}$ .

M. CRITTENDEN insiste sur le fait qu'il n'y a pas là une simple question de forme, qu'il ne suffit pas d'imposer à la courbe du thermomètre de passer par trois points pour qu'elle ait une forme définie.

M. PÉRARD lit alors le texte suivant :

« La pureté et les conditions physiques du platine avec lequel le thermomètre est construit doivent être telles que  $\frac{R_t}{R_0}$  ne soit pas inférieur à 1,391 pour  $t = 100^\circ$  et à 2,647 pour  $t = 444^\circ,60$ . »

Et au paragraphe *b*, il propose d'adopter la phrase suivante :

« En plus des exigences données au paragraphe *a*, le rapport  $\frac{R_{-182,97}}{R_0}$  doit être inférieur à 0,247 pour les thermomètres étalons à résistance devant être utilisés au-dessous du point de fusion de la glace. »

M. HALL attire l'attention sur le fait qu'il faudrait fixer une tolérance pour l'interprétation de ces conditions.

MM. PÉRARD et BOUTRY pensent que chaque expérimentateur est juge de la rigueur à apporter dans cette question.

M. le PRÉSIDENT signale alors les écarts observés à Leyde entre l'Échelle internationale et l'Échelle Kelvin, écarts atteignant 0,04 degré à  $-80^{\circ}$  et propose un tableau de correction.

M. CRITTENDEN se déclare peu favorable à l'adoption d'un tel tableau.

M. HALL demande quelle est la précision des mesures à  $-80^{\circ}$ .

M. le PRÉSIDENT déclare que Berlin et Leyde sont d'accord à 0,01 degré près.

Mais M. HENNING cite des expériences récentes, faites à Berlin avec du platine spectroscopiquement pur, qui ont donné à  $-80^{\circ}$  des écarts plus faibles, voisins de 0,02 degré au lieu de 0,04 degré.

M. le PRÉSIDENT remarque qu'il semble en résulter que l'incertitude de l'échelle au voisinage de  $-80^{\circ}$  est de l'ordre de 0,02 degré, puisque les thermomètres satisfont tous aux conditions imposées par les spécifications.

Après adoption du paragraphe *b*, M. le PRÉSIDENT passe à la discussion du paragraphe *c*.

M. HALL remarque que si la pile thermoélectrique doit être abandonnée dans un proche avenir pour le thermomètre à résistance, il est inutile de vouloir apporter de petites modifications à l'échelle qu'elle définit.

M. SEARS approuve M. Hall; il pense qu'il faut apporter le moins souvent possible des modifications aux définitions et éviter de faire des changements provisoires.

M. KONDRATIEV n'estime pas que la complication

apportée par la formule proposée soit utile au degré de précision des mesures actuelles.

M. RIBAUD demande qu'il soit précisé qu'au-dessus du point de fusion de l'antimoine les températures doivent être définies uniquement par le couple, sans qu'on ait le droit d'extrapoler les indications du thermomètre à résistance de platine.

M. CRITTENDEN rappelle que le but de la nouvelle rédaction est de faire raccorder les échelles sans discontinuité dans la dérivée.

M. HALL pense qu'on dépasse ici le degré de précision des mesures, et que la difficulté disparaîtrait d'elle-même avec la suppression du couple comme étalon.

M. PÉRARD remarque que la majorité du Comité semble souhaiter le *statu quo* et propose le texte de 1933 légèrement modifié comme suit :

« Du point de solidification de l'antimoine jusqu'au point de  
« solidification de l'or, on déduit la température  $t$  de la force  
« électromotrice  $\mathcal{E}$  d'un thermocouple étalon formé de platine et  
« de platine-rhodium, dont une soudure reste à la température  
« constante de 0°, tandis que l'autre est portée à la température  
« définie par la formule

$$\mathcal{E} = a + bt + ct^2.$$

« Les constantes  $a, b, c$  doivent être calculées... »

Le paragraphe  $c$  ainsi amendé est adopté.

M. le PRÉSIDENT fait remarquer que, dans le paragraphe  $d$ , il faut changer 273°,16 en 273°,15.

M. HENNING demande si l'on ne pourrait pas prendre dans la formule de Planck la valeur arrondie 273°,2.

Le Comité ne juge pas cette modification utile.

M. le PRÉSIDENT ouvre la discussion sur le changement de la constante  $C_2$ .

M. HALL trouve que la valeur 1,436 est sans doute la meilleure; mais elle n'est pas encore assez sûre pour qu'il soit intéressant de proposer le changement.

M. BOUTRY est du même avis.

Cette modification est ajournée à une autre session.

Le paragraphe *d* est adopté, la seule modification étant le remplacement de  $273^{\circ},16$  par  $273^{\circ},15$  et de 1,436 par 1,432.

La prochaine séance est fixée au 12 juillet à 10<sup>h</sup> au Laboratoire central d'Electricité.

La séance est levée à 17<sup>h</sup> 20<sup>m</sup>.



---

## PROCÈS-VERBAL

DE LA DEUXIÈME SÉANCE,

TENUE AU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ,

le mercredi 12 juillet 1939.

PRÉSIDENTE DE M. LE PROF. D<sup>r</sup> W. H. KEESOM.

---

Sont présents : M. B. CABRERA, secrétaire du Comité international des Poids et Mesures; MM. CRITTENDEN, HAYASHI (observateur), HENNING, KONDRATIEV, PÉRARD, RIBAUD, SEARS, BOUTRY, HALL, membres du Comité consultatif et experts.

Assistent à la séance : MM. ABRAHAM, VOLET, ROUX, TERRIEN, N. CABRERA, invités.

La séance est ouverte à 10<sup>h</sup> 5<sup>m</sup>.

M. le PRÉSIDENT donne la parole au Secrétaire pour la lecture du procès-verbal de la première séance. Après quelques modifications de détail demandées par MM. Boutry, Keesom et Pérard, le procès-verbal est adopté.

M. le PRÉSIDENT propose de continuer la discussion du projet d'échelle de température de 1939 par l'étude de la troisième partie; il attire l'attention sur le fait que ce chapitre a pour titre : « Modes opératoires recommandés », et n'implique donc pas une obligation. Il demande à la délégation française si elle peut préciser sa remarque

(Annexe T 8, p. T 101) concernant la précision de 0,001 degré indiquée dans le projet du Bureau of Standards, au sujet de la reproductibilité du point de fusion de la glace.

M. BOUTRY déclare avoir simplement pour désir d'obtenir de M. Crittenden des détails sur les méthodes employées.

M. CRITTENDEN répond que cette précision est facilement obtenue avec la méthode usuelle et en utilisant de la glace commerciale.

M. BOUTRY remarque que la glace commerciale n'a peut-être pas la même pureté dans tous les pays.

M. PÉRARD signale que l'on a fait au Bureau international des Poids et Mesures des mesures avec de la glace provenant d'eau distillée et avec de la glace commerciale, en prenant soin pour celle-ci, d'enlever la couche extérieure et le centre des blocs; les mesures de température effectuées ont donné exactement les mêmes résultats dans les deux cas.

M. BOUTRY, par contre, ayant utilisé pour congeler de l'eau des moules différents, l'un en acier inoxydable, l'autre en tôle galvanisée, a observé entre les températures de fusion de ces deux glaces des écarts de l'ordre du minimum mesurable, soit 0,001 degré; quoique la précaution d'enlever les parties extérieures et le centre du bloc ait été prise.

M. HALL signale qu'il a observé que la glace commerciale donnait presque toujours d'aussi bons résultats que celle provenant de l'eau distillée; il arrive cependant en moyenne deux ou trois fois par an que la glace commerciale donne des écarts de l'ordre de 0,01 degré;

mais on observe alors une nette variation de la conductibilité électrique de l'eau de fusion.

M. BOUTRY demande précisément que l'on spécifie ultérieurement la valeur admissible de la conductibilité de l'eau de fusion.

M. RIBAUD voudrait également que l'on spécifie ce que l'on entend par « eau saturée d'air » ; quoique, ajoute-t-il, les erreurs qui peuvent s'introduire de ce fait étant sans doute de l'ordre de 0,0001 degré, il ne soit peut-être pas la peine d'insister, d'autant plus que l'adoption éventuelle du point triple de l'eau comme point fixe fondamental supprimerait le problème.

M. PÉRARD pense que la spécification relative à l'air dissous est là pour indiquer simplement qu'il ne faut pas prendre de précautions spéciales pour avoir de l'eau parfaitement privée d'air.

Il attire ensuite l'attention sur la formule donnant l'influence de la pression et s'étonne de l'inégalité des coefficients de ses deux termes.

M. CRITTENDEN ne peut éclaircir ce point.

M. BOUTRY propose de conserver l'ancien texte, en réservant pour une session ultérieure l'établissement de nouvelles spécifications.

Le Comité partage cet avis et décide de garder provisoirement la rédaction admise en 1933.

M. le PRÉSIDENT passant à l'étude du paragraphe 3 demande à M. Crittenden de donner des précisions au sujet de l'hypsomètre mentionné dans le projet. M. Crittenden indique que cet appareil a été décrit par M. Beattie, mais qu'il n'est donné dans le projet qu'à titre d'indication.

M. HENNING demande qu'on spécifie que la température d'ébullition de l'eau doit être déterminée au voisinage de la pression atmosphérique normale, en employant au besoin une atmosphère artificielle; car la correction est incertaine dès que l'on s'écarte de cette pression.

M. KONDRATIEV propose de resserrer les limites données pour la validité de la formule de réduction à l'atmosphère normale et de prendre une formule plus simple.

M. le PRÉSIDENT demande de séparer la discussion de la formule de celle relative à la description de l'hypsomètre.

M. CABRERA propose d'insérer dans le texte une indication au sujet de l'hypsomètre.

M. BOUTRY suggère d'ajouter après les mots « avec succès » : « en particulier l'hypsomètre du type Chappuis ».

Après un échange de vues sur la limite de validité des formules de réduction, le texte suivant est proposé par M. Boutry :

« Il est recommandé de faire les mesures sous une pression « aussi voisine que possible de  $p = 760^{\text{mm}}$  de mercure, en utilisant « au besoin une atmosphère artificielle. Pour conserver une « exactitude d'environ 0,001 degré dans tout le domaine compris « entre  $p = 660^{\text{mm}}$  et  $p = 860^{\text{mm}}$ , on peut utiliser la formule « ci-dessous

$$t_p = t_{760} + 36,8578 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 20,159 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2 + 16,21 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^3 .$$

« En dehors de ce domaine de pression, la formule suivante doit « être préférée :

$$t_p = \frac{326}{1 - 0,197864 \log_{10} \frac{p}{760}} - 226. »$$

Ce texte est adopté après que M. CARRERA eut précisé, à la suite d'une observation de M. PÉRARD, qu'il ne s'agissait pas là de cas distincts, mais d'indications pour l'exécution des mesures dans des conditions expérimentales de difficulté croissante.

M. le PRÉSIDENT passe à l'examen des paragraphes 4 et 5; personne n'ayant d'objection à faire, ceux-ci sont adoptés.

M. le PRÉSIDENT rappelle qu'il y a lieu d'incorporer dans le paragraphe 6 un membre de phrase éliminé dans le paragraphe 4 de la deuxième partie. Le Comité charge M. Pérard de faire cette mise au point dans le texte définitif.

M. HALL propose de supprimer les spécifications relatives au coefficient  $\delta$  de la formule de Callendar.

AUCUN membre n'ayant à faire d'observation, M. le PRÉSIDENT déclare le paragraphe adopté et passe à l'examen du paragraphe 8.

M. CRITTENDEN fait remarquer que, l'ancienne valeur de  $C_2$  ayant été maintenue, la fin du paragraphe 8 doit être modifiée.

Après une discussion à laquelle prennent part MM. Boutry, Crittenden, Hall, Keesom et Pérard, le paragraphe 8, limité à sa première phase, est adopté en mettant dans la formule le symbole  $C_2$ , au lieu de sa valeur numérique et en ajoutant après cette formule : « dans laquelle la constante  $C_2$  est égale à 1,432 centimètre.degré ».

M. le PRÉSIDENT signale que dans le paragraphe 9 la valeur de  $T_0$  doit être prise égale à 273,15. Le paragraphe 9 est adopté et M. le Président appelle la discussion du paragraphe 10.

M. BOUTRY propose de supprimer le chiffre du centième de la température d'équilibre entre l'anhydride carbonique solide et sa vapeur. Il signale la difficulté de reproduire exactement ce point, et souhaite que des études soient poursuivies pour établir dans cette région de l'échelle un point fixe secondaire bien défini.

Cette proposition est adoptée.

M. HENNING propose, et le Comité décide, de maintenir l'ancienne valeur ( $-38^{\circ},87$ ) pour la température de solidification du mercure.

M. le PRÉSIDENT recommande que l'on travaille à redéterminer ces valeurs.

M. HALL estime qu'il est illusoire de donner les températures de fusion du cuivre et du nickel au dixième de degré.

M. CRITTENDEN est de cet avis et signale que les valeurs portées au tableau ne sont valables que dans l'échelle de température proposée dans le projet, qui n'est pas celle adoptée, et qu'il faut donc revenir aux anciens chiffres. Il soumet alors le tableau suivant à la discussion, après y avoir ajouté, à la demande de M. Hall, le point de fusion du rhodium :

	Anciennes valeurs.	Valeurs proposées.
Nickel.....	—	1455
Palladium.....	1555	1554
Platine.....	—	1773,5
Rhodium (N. P. L.).....	—	1966
Iridium.....	—	2454
Tungstène.....	3400	3410

M. HALL croit qu'on ne connaît pas la température de solidification du platine à mieux de 1 ou 2 degrés près et trouve inutile la décimale.

M. HENNING déclare que ses mesures lui font préférer le

nombre 1773. Quant à la température de fusion du tungstène, elle a été trouvée, dans son laboratoire, égale à 3380°.

Comme conclusion de l'examen des nombres du tableau précédent, le Comité décide finalement de conserver pour le palladium et le tungstène les anciennes valeurs et de supprimer la décimale du nombre relatif au platine.

M. BOUTRY demande que l'on recommande d'effectuer dans plusieurs laboratoires des comparaisons systématiques entre l'échelle thermodynamique et la nouvelle échelle internationale dans toute l'étendue de — 190° à 1063°; un tel travail pourra sans doute être commencé en France en 1940.

M. KONDRATIEV approuve la demande de M. Boutry.

M. RIBAUD souhaiterait que préalablement quelques points fixes dans la région de 800° soient déterminés.

M. PÉRARD désire que le Comité se prononce sur l'usage de la lettre *t* pour désigner la température, celle-ci étant employée dans le projet d'échelle de température, alors que la lettre adoptée par le Bureau international dans toutes ses publications est actuellement la lettre *θ*.

M. le PRÉSIDENT répond que la lettre *t* sera employée pour la température dans tous les cas où la confusion avec un temps ne sera pas possible.

Le Comité ayant terminé l'étude du projet de définition de l'Échelle internationale de température, M. le PRÉSIDENT charge M. Pérard d'en harmoniser l'introduction avec les décisions prises au cours de la discussion (1).

---

(1) Le texte définitif du projet n'a pas été reproduit ici en raison de sa longueur; on le trouvera dans le Rapport au Comité international (p. T 39).

### L'UNITÉ DE CHALEUR.

L'ordre du jour appelant maintenant la discussion de la proposition relative à la définition de l'unité de chaleur, M. le PRÉSIDENT confirme d'abord que, sur la demande du Président de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, un vote unanime du Comité international des Poids et Mesures a autorisé le Comité consultatif à s'occuper de cette question; puis il résume le rapport qu'il a préparé (Annexe T II, p. T 110), et insiste sur le fait qu'il lui semble impossible d'éliminer la calorie, qui entre dans une multitude de règlements en vigueur et que, de plus, du point de vue pédagogique, il convient de réserver une place à part à l'énergie calorifique. Il est impossible, en effet, à cause du deuxième principe, de la placer exactement sur le même plan que les autres formes d'énergie, pour aucune de celles-ci, il n'existe en particulier de relation semblable à celle qui exprime le rendement d'une machine frigorifique.

Se rapportant au mémorandum du National Bureau of Standards sur ce sujet, M. le PRÉSIDENT demande au Comité de se prononcer sur les deux points suivants :

1° Doit-on définir une unité déduite du joule ?

2° Si l'on définit la calorie, quel facteur de correspondance avec les unités d'énergie doit-on adopter :  $\frac{3600}{860}$  ou 4,187 ?

M. SEARS demande que l'on se mette préalablement en rapport avec les organismes spécialisés tels que l'Union internationale de Physique pure et appliquée et la Conférence internationale des Tables de la vapeur d'eau. Il accepte de voir définir la calorie à partir du joule mécanique; mais il propose de conserver la définition à partir du joule électrique jusqu'à ce que celui-ci devienne automatiquement égal au joule mécanique.

M. PÉRARD précise que cette transformation des unités électriques ne pourra pas devenir effective en janvier 1946 comme il avait été prévu; par ailleurs, il émet l'avis que les écarts sont très petits et très inférieurs à la précision des mesures calorimétriques.

M. ABRAHAM exprime son opinion en indiquant qu'elle n'engage que lui et non l'Union internationale de Physique, dont il est secrétaire général.

M. ABRAHAM pense qu'il faut distinguer entre la définition idéale de l'unité de quantité de chaleur et la définition objective de l'unité pratique qu'on en déduit. Il propose de définir l'unité de quantité de chaleur comme étant la quantité de chaleur équivalente à l'unité d'énergie : joule ou erg.

Pour la définition pratique, il faut tenir compte du changement qui s'est produit dans la technique. Alors qu'auparavant, la détermination d'une quantité de chaleur se faisait par mesure de l'élévation de température d'une masse d'eau, les mesures précises de calorimétrie se font maintenant par une méthode analogue à la double pesée, en effectuant un dégagement de chaleur par voie électrique produisant le même effet que la quantité de chaleur à mesurer.

M. PÉRARD spécifie que la définition d'une unité doit être indépendante de la méthode de reproduction de cette unité.

M. SEARS désire éviter que la nouvelle définition s'éloigne des valeurs ayant servi à l'établissement de la Table de la vapeur d'eau et demande qu'on n'introduise pas de définition théorique sans valeur pratique.

M. CRITTENDEN signale qu'en particulier l'organisme dirigé par M. Swietoslowski s'intéresse à ces questions

d'unité de chaleur et que beaucoup d'autres organismes sont dans ce cas, et il pose la question de savoir comment la collaboration avec tous ceux-ci serait pratiquement possible.

M. PÉRARD répond que cette question en quelque sorte administrative pourrait être réglée par correspondance en dehors du Comité consultatif et avant la prochaine réunion du Comité international des Poids et Mesures.

M. le PRÉSIDENT propose de prendre la calorie équivalente à 4,187 joules absolus, cette valeur ayant l'avantage de n'entraîner aucun changement de la Table de la vapeur d'eau, tandis que l'adoption de la valeur  $\frac{3600}{860}$  joules, préférée par M. Sears, est susceptible d'entraîner quelques modifications.

M. ABRAHAM dit que l'Union internationale de Physique se réunira l'année prochaine et que la question de l'unité de chaleur devait y être discutée; il pense qu'il serait suffisant de donner la définition théorique de l'unité.

M. KONDRATIEV propose d'accepter cette définition théorique et de garder comme définition pratique celle de la calorie à 15°.

M. PÉRARD donne alors lecture d'un projet de définition rédigé comme suit :

« a. L'unité primaire de quantité de chaleur est l'unité d'énergie désignée sous le nom de joule, égale à  $10^7$  ergs.

« b. L'unité secondaire est la calorie, égale à  $\frac{3600}{860}$  joules

« ou  $\frac{1}{860}$  wattheure.

« Dans les besoins de la pratique, cette unité est suffisamment bien représentée par la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau purgée d'air de 14°,5 à 15°,5 de l'échelle internationale de température sous la pression d'une atmosphère normale.

« Les termes précédemment employés de « calorie-kilogramme » et « grande calorie » sont remplacés par celui de « kilocalorie ». « La kilocalorie se trouve ainsi égale à  $\frac{1}{860}$  kilowattheure.

« REMARQUE IMPORTANTE. — Le kilojoule est très voisin de l'unité de chaleur britannique :

$$1 \text{ BTU} = 1,055 \text{ kJ. »}$$

M. ABRAHAM ne trouve pas satisfaisant de parler d'unité secondaire. Il faudrait mettre en évidence qu'on devra renoncer à la calorie à 15°, mais que, pour rattacher les mesures faites par détermination de l'élévation de température d'une masse d'eau à celles faites par la méthode moderne, on est amené à adopter provisoirement une valeur de cette calorie permettant d'exprimer les résultats en unités fondamentales (joules).

La valeur de la calorie est un coefficient de transformation pour passer d'un mode d'expérimentation périmé au mode d'expérimentation actuel, celui-ci donnant la mesure de la quantité de chaleur en unités mécaniques en passant par l'intermédiaire de mesures électriques.

M. CABRERA partage l'avis de M. Abraham et trouve cette définition plus simple que les précédentes.

M. le PRÉSIDENT dit qu'il faudrait préciser si la transformation s'applique à la calorie à 20° ou à 15°.

M. ABRAHAM réplique qu'à son avis la distinction entre ces deux sortes de calories est illusoire; il estime qu'en toute rigueur la mesure de l'intervalle de température 14°,5-15°,5 fait intervenir les erreurs de détermination de ces deux températures.

M. PÉRARD pense qu'en réalité, il y a des erreurs systématiques qui se reproduisent dans les deux mesures et que l'erreur sur la mesure de l'intervalle de 1 degré est

inférieure à la somme des erreurs sur la mesure des deux limites de l'intervalle.

M. ABRAHAM rappelle que dans les expériences de Rowland, celui-ci, pour augmenter la précision, avait dû faire porter ses mesures sur un intervalle de température de 10 degrés, et qu'en définitive la valeur de la véritable « calorie à 15° » ne doit pas être connue à mieux de 0,5‰.

M. KONDRATIEV pense que cela est exact si l'on ne considère qu'une série d'expériences, mais cesse de l'être si l'on fait la moyenne des résultats de plusieurs expériences faites dans des conditions différentes.

M. le PRÉSIDENT serait alors d'avis de simplifier la proposition et d'y énoncer simplement que la calorie est l'équivalent d'un certain nombre de joules.

M. SEARS voudrait que l'on spécifie qu'elle vaut  $\frac{1}{860}$  watt-heure.

M. CABRERA distingue dans la définition deux parties bien séparées; la première spécifiant que l'unité de chaleur doit s'exprimer en joules, et la deuxième indiquant combien cette unité, la calorie, vaut de joules.

M. PÉRARD propose alors de modifier la première partie de la définition conformément au texte suivant, qui est lu par M. le Président :

« L'unité de quantité de chaleur est la quantité de chaleur  
« équivalente à l'unité d'énergie désignée sous le nom de joule  
« et égale à  $10^7$  ergs. »

Cette modification est approuvée par le Comité.

A la suite d'une discussion entre MM. PÉRARD, SEARS et KEESOM, il est convenu d'ajouter en remarque :

« Cette unité de chaleur est pratiquement égale à l'ancienne  
« calorie dite à 15°C. »

M. CRITTENDEN demande qu'il soit précisé que le texte

proposé n'est pas une résolution, mais une recommandation.

M. BOUTRY demande que, pour satisfaire à ce désir, il soit spécifié dans le procès-verbal que la recommandation ne sera pas présentée au Comité international des Poids et Mesures avant que les organismes que la question intéresse aient été consultés.

Cette procédure est approuvée par le Comité.

M. ABRAHAM suggère d'ajouter une remarque recommandant de faire les mesures de quantité de chaleur par comparaison avec la quantité de chaleur dégagée par un courant.

M. BOUTRY objecte que la portée de cette remarque n'est pas générale, la méthode n'étant pas utilisée, par exemple, en thermochimie.

M. ABRAHAM pense qu'il suffira de mentionner que cette technique est recommandée « pour les mesures précises ».

M. PÉRARD lit alors la rédaction suivante à proposer au Comité international des Poids et Mesures :

#### RÉSOLUTION II.

*a. L'unité de quantité de chaleur est la quantité de chaleur équivalente à l'unité d'énergie désignée sous le nom de « joule », égale à  $10^7$  ergs.*

*b. La « calorie » est équivalente à  $3600/860$  joules ou  $1/860$  wattheure.*

*c. Les termes précédemment employés de « calorie-kilogramme » et « grande calorie » sont remplacés par celui de « kilocalorie ». La kilocalorie se trouve ainsi égale à  $1/860$  kilowattheure.*

REMARQUE 1. — *Le kilojoule est très voisin de l'unité de chaleur britannique*

$$1 \text{ BTU} = 1,055 \text{ kilojoule.}$$

REMARQUE 2. — *La calorie est pratiquement égale à l'ancienne calorie dite à 15°C.*

REMARQUE 3. — *En l'état actuel de la technique, la manière la plus précise de mesurer des quantités de chaleur est d'opérer par comparaison avec les quantités équivalentes d'énergie électrique.*

Cette résolution est adoptée à l'unanimité.

M. PÉRARD ajoute que la remarque 3 montre bien que, dans le paragraphe *b* de la définition, les unités d'énergie mentionnées sont des unités mécaniques. Il précise d'autre part que l'insertion au procès-verbal de l'obligation d'une consultation des organismes intéressés implique que la résolution ne sera présentée, en cas d'objection de l'un d'eux, qu'après nouvel avis des membres du Comité consultatif.

#### PROCHAINE SESSION.

M. PÉRARD propose de laisser à M. le Président, comme cela a été fait pour les autres Comités consultatifs, l'initiative de convoquer celui-ci, s'il le juge nécessaire, avant la session de 1941 du Comité international des Poids et Mesures.

Cette proposition est adoptée.

L'ordre du jour étant épuisé, M. le PRÉSIDENT remercie ses collègues, dont la courtoisie et la bonne volonté lui ont rendu la tâche facile.

De son côté, M. CABRERA remercie M. Keesom, au nom des membres du Comité, pour la clarté et la bienveillante autorité avec lesquelles il a su diriger les discussions.

Le Comité confie à son Président le soin d'approuver le procès-verbal de cette dernière séance, après consultation du Rapporteur.

La séance est levée à 12<sup>h</sup> 40<sup>m</sup>.

---

---

PREMIER RAPPORT  
DU  
COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE  
AU  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES.

Par M. J. E. SEARS, Rapporteur.

---

Le Comité a tenu deux réunions, le mardi 11 juillet, à Sèvres au Bureau international des Poids et Mesures, et le mercredi 12 juillet, à Paris au Laboratoire central d'Électricité, 14, rue de Staël, grâce à l'obligeant accueil de son directeur M. Jouaust.

Étaient présents à ces réunions : M. W. H. Keesom, Président, MM. Crittenden, Hayashi (observateur), Henning, Kondratiev, Pérard, Ribaud et Sears, membres du Comité; MM. B. Cabrera et Fabry, membres du Comité international; MM. Boutry et Hall, experts, MM. Abraham, N. Cabrera, Roux, Terrien et Volet invités.

M. Volet fut nommé Secrétaire et M. Sears Rapporteur de la session.

NOMINATIONS AUX SIÈGES VACANTS DU COMITÉ.

Conformément aux termes de son règlement, le Comité procéda à l'examen préalable des nominations à soumettre

au Comité international pour remplir les sièges demeurant vacants. On décida de recommander la nomination de M. Pochettino (Italie), M. Swietoslowski (Pologne) et M. Timmermans (Belgique).

POSITION DU POINT DE FUSION DE LA GLACE  
DANS L'ÉCHELLE ABSOLUE DES TEMPÉRATURES.

Le Comité aborda alors la discussion de la position à assigner au point de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin, dans le but de recommander une base uniforme pour convertir les températures de l'échelle centigrade dans l'échelle Kelvin et réciproquement.

On convint de recommander  $273^{\circ},15\text{K}$  comme étant la meilleure valeur provisoire du zéro de l'échelle centigrade dans l'échelle Kelvin découlant des résultats expérimentaux actuels. On admit que cette valeur était très probablement correcte à  $\pm 0,02$  degré près. Ces conclusions sont exprimées dans la résolution suivante :

RÉSOLUTION I.

*Le Comité consultatif de Thermométrie estime que, d'après les expériences actuellement terminées, la position la plus probable du point de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin est  $273^{\circ},15$  avec une incertitude de  $\pm 0,02$  degré.*

ÉCHELLE DES TEMPÉRATURES INFÉRIEURES A  $-190^{\circ}\text{C}$ .

Le Comité procéda à l'examen de l'échelle thermodynamique dans le domaine inférieur à  $-190^{\circ}\text{C}$ . On reconnut qu'il fallait encore étudier la question, avant que puissent être établies dans ce domaine les spécifications d'une

échelle internationale des températures, comparables à celles déjà adoptées pour les domaines des températures plus élevées.

DÉFINITION DE L'ÉCHELLE ABSOLUE DES TEMPÉRATURES.

Le Comité discuta ensuite une suggestion du Comité pour les basses températures du Conseil des Recherches des États-Unis, transmise pour examen par le National Bureau of Standards de Washington, et selon laquelle le point d'ébullition de l'eau serait remplacé, en tant que l'un des points fixes fondamentaux de l'échelle des températures, par le zéro absolu. En d'autres termes l'intervalle compris entre le zéro absolu et le point de congélation de l'eau serait à l'avenir adopté comme intervalle fondamental de l'échelle; sur cette échelle, le point d'ébullition de l'eau deviendrait donc un des points fixes primaires (mais non plus fondamental), et son rôle deviendrait comparable par exemple à celui des points d'ébullition du soufre ou de fusion de l'or.

Une autre suggestion concernant l'intervalle fondamental de l'échelle des températures, soumise à la discussion par la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, était la substitution du point triple de l'eau au point de fusion de la glace.

Après discussion, le Comité déclara qu'avant d'introduire aucun changement, il était souhaitable de faire une plus ample étude de ces propositions, et que ceux des Laboratoires nationaux, qui ne l'avaient pas encore fait, devraient être invités à poursuivre des expériences sur la reproductibilité du point triple.

RÉVISION DE L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DES TEMPÉRATURES.

On examina ensuite un certain nombre de propositions soumises par le National Bureau of Standards de

Washington pour amender l'échelle internationale des températures 1927-1933.

Ces propositions étaient, d'une part, d'ordre rédactionnel et consistaient en un réarrangement général des paragraphes avec de petits amendements du texte; elles suggéraient d'autre part des améliorations techniques. D'un commun accord, on a admis qu'il n'était pas désirable de faire des modifications n'ayant qu'un caractère provisoire, ni de changer sensiblement l'échelle à des intervalles de temps trop rapprochés. C'est pourquoi, sauf les améliorations d'ordonnance du texte, on n'accepta que les modifications jugées formellement nécessaires dans l'état actuel, ou pouvant être considérées comme des améliorations techniques n'affectant pas les fondements de l'échelle.

Les principaux amendements dont on a ainsi recommandé l'adoption sont relatifs aux points suivants :

*a.* Les spécifications qui concernent la qualité des matériaux à utiliser dans les thermomètres à résistance et dans les thermocouples ont été rendues un peu plus sévères.

*b.* Le passage de l'emploi du thermomètre à résistance de platine à l'emploi du thermocouple se fait maintenant au point de fusion de l'antimoine ( $630^{\circ},5$  C environ) et non plus à  $660^{\circ}$  C.

A ce propos, on examina la proposition de la P. T. R. tendant à écarter l'usage des thermocouples et à employer le thermomètre à résistance de platine dans tout le domaine allant jusqu'au point de fusion de l'or. Le Comité n'était pas en mesure d'adopter aussitôt cette proposition; mais il recommanda aux autres laboratoires nationaux d'étudier l'emploi du thermomètre à résistance de platine dans ce domaine de température élargi.

c. On substitua la loi de Planck à la loi de Wien dans la détermination des températures supérieures au point de fusion de l'or.

On discuta à ce propos l'opportunité de substituer dans la formule la valeur 1,436 cm. degré à la valeur 1,432 cm. degré. On fut d'accord pour reconnaître que la valeur 1,436 était probablement plus exacte que la valeur 1,432. Mais on jugea que, dans le domaine des températures actuellement couvert par l'échelle internationale, la différence introduite par cette modification de la constante ne dépasserait pas l'incertitude des déterminations de température, et qu'il valait donc mieux différer tout changement, jusqu'à ce qu'on disposât d'autres preuves expérimentales de la vraie valeur de  $C_2$ .

d. Dans la liste des points fixes secondaires, la température de solidification du zinc a été arrondie à  $419^{\circ},5$  au lieu de  $419^{\circ},45$ , et l'on a introduit les températures de solidification du nickel ( $1455^{\circ}$ ), du platine ( $1773^{\circ}$ ), du rhodium ( $1966^{\circ}$ ) et de l'iridium ( $2454^{\circ}$ ).

Le texte complet des spécifications révisées, telles qu'elles ont été recommandées par le Comité consultatif, est joint à ce rapport (p. T 39).

Il peut être utile maintenant d'énumérer les questions suivantes qui demeurent encore à l'étude, afin d'aboutir ultérieurement à une révision générale de l'échelle internationale des températures.

1. La définition de l'intervalle fondamental de l'échelle.
2. La substitution du point triple de l'eau au point de fusion de la glace.
3. Le remplacement du thermocouple par le thermomètre à résistance de platine dans le domaine  $630^{\circ},5\text{ C}$  à  $1063^{\circ}\text{C}$ .
4. La révision de la valeur de la constante  $C_2$ .

5. De ce fait, ou pour toute autre cause, la révision des points fixes de l'échelle.

DÉFINITION DE L'UNITÉ DE CHALEUR.

Finalement le Comité consultatif porta son attention sur une question soulevée par une demande du Président Stark de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, concernant la définition de l'unité de chaleur, et au sujet de laquelle le Président Keesom avait présenté un rapport très exactement documenté.

On reconnut que cette question avait déjà été étudiée par d'autres organismes importants comme la Conférence internationale des Tables de la vapeur d'eau, et l'Union internationale de Physique pure et appliquée. On décida de ne pas demander au Comité international des Poids et Mesures de donner son approbation formelle à un texte quelconque sur ce sujet, avant d'avoir préalablement consulté les autres organisations intéressées. C'est sous cette réserve que le Comité a recommandé à l'unanimité l'adoption de la résolution suivante :

RÉSOLUTION II.

*a. L'unité de quantité de chaleur est la quantité de chaleur équivalente à l'unité d'énergie désignée sous le nom de « joule », égale à  $10^7$  ergs.*

*b. La calorie est équivalente à  $3600/860$  joules ou  $1/860$  wattheure.*

*c. Les termes précédemment employés de « calorie-kilogramme » et « grande calorie » sont remplacés par celui de « kilocalorie ». La kilocalorie se trouve ainsi égale à  $1/860$  kilowattheure.*

REMARQUE 1. — *Le kilojoule est très voisin de l'unité de chaleur britannique*

$$1 \text{ BTU} = 1,055 \text{ kilojoule.}$$

REMARQUE 2. — *La calorie est pratiquement égale à l'ancienne calorie dite « à 15° C ».*

REMARQUE 3. — *En l'état actuel de la technique, la manière la plus précise de mesurer les quantités de chaleur est d'opérer par comparaison avec les quantités équivalentes d'énergie électrique.*

## PROJET DE RÉDACTION

DE

### L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE DE 1939

SOUMIS PAR LE COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE  
AU COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES.

#### PREMIÈRE PARTIE.

##### INTRODUCTION.

L'échelle thermodynamique de température, connue communément sous le nom d'échelle Kelvin, est regardée généralement comme l'échelle fondamentale à laquelle on doit pouvoir rapporter finalement toute détermination de température. Les températures de l'échelle Kelvin sont désignées par °K. et sont représentées par le symbole  $T$ . Dans cette échelle, l'intervalle qui sépare le point de fusion de la glace  $T_0$  et le point d'ébullition de l'eau, tel qu'il est défini dans la deuxième Partie, est de 100 degrés. Dans l'échelle thermodynamique centigrade, les températures sont désignées par °C, et sont représentées par le symbole  $t$ . Cette dernière échelle ne diffère de l'échelle Kelvin que par la position de son zéro, qui est situé au point de fusion de la glace, de telle sorte que  $t = T - T_0$ .

L'échelle Kelvin et l'échelle thermodynamique centigrade qui en dérive sont, par la présente déclaration, adoptées en principe par la Neuvième Conférence Générale des Poids et Mesures.

Les difficultés expérimentales inhérentes aux mesures de température dans l'échelle thermodynamique ont conduit à l'adoption en 1927, par la Septième Conférence Générale des Poids et Mesures, d'une échelle pratique, qui a été désignée sous le nom d' « Échelle internationale de température ». Cette échelle concordait avec l'échelle thermodynamique centigrade aussi étroitement qu'il était possible dans l'état des connaissances à cette époque, et fut établie de façon qu'elle fût aisément et exactement reproductible et qu'elle fournît la possibilité de spécifier d'une façon univoque toute température comprise dans le domaine de l'échelle.

L'échelle définie ci-dessous constitue la première révision de celle qui avait été adoptée en 1927.

Les modes opératoires par lesquels on devra réaliser l'échelle sont en substance inchangés. Les révisions dans la définition de l'échelle qui ont pour conséquence des changements de la valeur numérique assignée à une température sont : *a.* une subdivision de l'échelle au point de solidification de l'antimoine, au lieu de  $660^{\circ}\text{C}$ ; *b.* la définition de l'échelle au-dessus du point de solidification de l'or en fonction de la formule du rayonnement de Planck avec une valeur plus précise de  $T_0$ , au lieu de la formule de Wien. Il n'y a pas de limite supérieure à l'échelle définie ainsi.

Jusqu'à  $1063^{\circ}\text{C}$ , l'échelle définie est identique à l'échelle de 1927, à l'exception de l'intervalle compris entre le point de solidification de l'antimoine et  $660^{\circ}\text{C}$ , dans lequel la nouvelle échelle se place au-dessous de l'ancienne, la différence atteignant  $0,14$  degré aux environs de  $660^{\circ}\text{C}$ .

Au-dessus de  $1063^{\circ}\text{C}$ , la formule de Planck conduit à des valeurs plus petites que la formule de Wien de l'échelle de 1927; mais la différence n'atteint 1 degré que pour des températures supérieures à  $3500^{\circ}\text{C}$ . Les températures dans l'échelle internationale de température de 1927 étaient désignées par «  $^{\circ}\text{C}$  » ou «  $^{\circ}\text{C}$  (int.) ». Comme la désignation «  $^{\circ}\text{C}$  » est conservée dans cette révision, elle devrait à l'avenir être appliquée aux températures exprimées dans la dernière échelle adoptée avant l'époque à laquelle la désignation est utilisée. Là où quelque doute pourrait surgir, l'année de l'adoption devrait être aussi spécifiée.

## DEUXIÈME PARTIE.

### DÉFINITION DE L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE DE 1939.

1. Les températures dans l'échelle internationale de température de 1939 seront désignées par «  $^{\circ}\text{C}$  » ou «  $^{\circ}\text{C}$  (int. 1939) » et représentées par le symbole  $t$ .

2. L'échelle est fondée sur un certain nombre de températures d'équilibre, fixes et reproductibles ou points fixes, auxquels sont assignées des valeurs numériques, et sur des formules spécifiées pour la relation entre la température et les indications des instruments étalonnés au moyen de ces points fixes.

3. Les points fixes fondamentaux, les points fixes primaires et les valeurs numériques assignées à ceux-ci sont donnés dans le Tableau I. Ces valeurs, dans chaque cas, définissent la température d'équilibre lorsque la pression est  $1,01325 \cdot 10^6$  dynes/cm<sup>2</sup>, ce qui correspond à la hauteur barométrique normale.

TABLEAU I.

*Points fixes fondamentaux et points fixes primaires sous la pression normale de  $1,01325 \cdot 10^6$  dynes/cm<sup>2</sup>.*

	Tempé- rature °C.
<i>a.</i> Température d'équilibre entre l'oxygène liquide et sa vapeur (point d'ébullition de l'oxygène)..	— 182,97
<i>b.</i> Température d'équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air (point de fusion de la glace). <i>Point fixe fondamental</i> .....	0
<i>c.</i> Température d'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur (point d'ébullition de l'eau). <i>Point fixe fondamental</i> .....	100
<i>d.</i> Température d'équilibre entre le soufre liquide et sa vapeur (point d'ébullition du soufre).....	444,60
<i>e.</i> Température d'équilibre entre l'argent solide et l'argent liquide (point de solidification de l'argent).....	960,5
<i>f.</i> Température d'équilibre entre l'or solide et l'or liquide (point de solidification de l'or).....	1063,0

4. Les procédés d'interpolation conduisent à un partage de l'échelle en quatre régions :

*a.* Du point de fusion de la glace au point de solidification de l'antimoine, la température  $t$  est définie par la formule

$$R_t = R_0(1 + A t + B t^2),$$

dans laquelle  $R_t$  est la résistance à la température  $t$  d'un thermomètre étalon à résistance de platine. Les constantes  $R_0$ ,  $A$  et  $B$  sont déterminées par des comparaisons au point de fusion de la glace et aux points d'ébullition de l'eau et du soufre. La pureté et les conditions physiques du platine avec lequel le thermomètre est construit doivent être telles que le rapport  $\frac{R_t}{R_0}$  ne soit pas inférieur à 1,391 pour  $t = 100^\circ$ , et à 2,647 pour  $t = 444^\circ, 60$ .

b. De  $-190^{\circ}\text{C}$  au point de fusion de la glace, la température  $t$  est définie par la formule

$$R_t = R_0 [1 + A t + B t^2 + C (t - 100) t^3],$$

dans laquelle  $R_t$  a la signification spécifiée ci-dessus, la constante  $C$  étant calculée à partir de la valeur mesurée de  $R_t$  au point d'ébullition de l'oxygène, après que les trois autres constantes ont été déterminées comme il est spécifié au paragraphe  $a$ .

En plus des exigences données au paragraphe  $a$ , le rapport  $\frac{R_{-182,97}}{R_0}$  doit être inférieur à 0,247 pour les thermomètres étalons à résistance devant être utilisés au-dessous du point de fusion de la glace.

c. Du point de solidification de l'antimoine jusqu'au point de solidification de l'or, on déduit la température  $t$  de la force électromotrice  $\mathcal{E}$  d'un thermocouple étalon formé de platine et de platine-rhodium, dont une soudure reste à la température constante de  $0^{\circ}$ , tandis que l'autre est portée à la température  $t$  définie par la formule

$$\mathcal{E} = a + bt + ct^2.$$

Les constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , doivent être calculées à partir des valeurs mesurées de  $\mathcal{E}$  au point de solidification de l'antimoine, au point de solidification de l'argent et au point de solidification de l'or.

Dans la détermination de ces constantes, la température que l'on doit assigner au point de solidification de l'antimoine utilisé est la valeur déterminée pour cet échantillon particulier avec un thermomètre étalon à résistance de la façon spécifiée au paragraphe 4a. L'antimoine utilisé doit avoir un point de solidification qui ne soit pas inférieur à  $630^{\circ},3\text{C}$ .

Le platine du couple thermoélectrique étalon sera d'une pureté telle que le rapport  $\frac{R_{100}}{R_0}$  ne soit pas inférieur à 1,391. Le fil d'alliage doit contenir 90 pour 100 de platine et 10 pour 100 de rhodium en poids. Le couple thermoélectrique sous sa forme définitive doit développer une force électromotrice comprise entre 10200 et 10400 microvolts lorsque l'une des soudures est au point de fusion de la glace et l'autre au point de solidification de l'or.

*d.* Au-dessus du point de solidification de l'or, 1063°,0 C, la température  $t$  est définie par la formule

$$\frac{J_t}{J_{1063^{\circ},0}} = \frac{\frac{C_2}{e^{1336^{\circ},13} \lambda} - 1}{\frac{C_2}{e^{(t+273^{\circ},15)} \lambda} - 1}$$

dans laquelle  $\lambda$  est une longueur d'onde du spectre visible,  $e$  est la base des logarithmes népériens,  $J_t$  est l'énergie de rayonnement (de longueur d'onde  $\lambda$ ) par intervalle unité de longueur d'onde, émise en une unité de temps par l'unité d'aire d'un corps noir à la température  $t$ , et  $C_2$  est pris égal à 1,432 cm. degré.

### TROISIÈME PARTIE.

#### MODES OPÉRATOIRES RECOMMANDÉS ET RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES.

Chacun des points fixes est donné comme étant la température d'équilibre sous une pression de  $1,01325 \cdot 10^6$  dynes/cm<sup>2</sup>. En étalonnant un thermomètre à résistance ou un couple thermoélectrique à ces points fixes, il est nécessaire que la partie sensible de l'instrument de mesure soit amenée aussi près que possible de la température d'équilibre.

La température d'équilibre entre un liquide et sa vapeur varie notablement avec la pression. La pression de  $1,01325 \cdot 10^6$  dynes/cm<sup>2</sup> correspond à la pression exercée par une colonne de mercure de 760<sup>mm</sup>, soumise à une attraction de pesanteur de 980,665 dynes/g, et ayant une masse spécifique de 13,5951 g/cm<sup>3</sup>, valeur admise pour le mercure ordinaire pur à 0°C sous la pression moyenne existant dans une telle colonne de mercure.

Dans les paragraphes suivants concernant les points fixes, le dispositif expérimental et le mode opératoire recommandés sont ceux que l'expérience a montrés satisfaisants. Lorsque la température d'équilibre dépend de la pression dans une mesure appréciable, des formules représentant la relation entre la pression et la température d'équilibre sont données. Comme ces formules ne sont pas rigoureuses, il est désirable que les températures d'équilibre réalisées expérimentalement s'approchent de celles qui sont définies dans la deuxième partie, puisque tout écart à partir de la pression spécifiée introduit une incertitude qui augmente avec la grandeur de l'écart. Dans les formules donnant la variation de la température d'équilibre entre un liquide et sa vapeur, la pression, dans la région où le fil résistant de platine est logé, est celle qui doit être utilisée pour calculer la température correspondant à  $R_t$ .

1. *Point d'ébullition de l'oxygène.* — La température d'équilibre entre l'oxygène liquide et sa vapeur est réalisée expérimentalement au mieux par la méthode statique. Le thermomètre étalon à résistance et la surface libre de l'oxygène liquide dans son récipient sont amenés à la même température dans un cryostat convenable, qui peut être par exemple un bain bien agité d'oxygène liquide (cet oxygène n'a pas besoin d'être de grande pureté), ou

un bloc de métal dans un tel bain. Le tube qui relie l'espace contenant l'oxygène liquide pur au manomètre utilisé pour la mesure de la pression de vapeur devrait être protégé contre des températures inférieures à la température de l'oxygène liquide pur à l'endroit où se trouve le fil résistant du thermomètre étalon. La température à la surface d'un bain d'oxygène liquide peut être sensiblement plus basse que la température en des points situés à l'intérieur du bain.

La température d'équilibre  $t_p$  correspondant à une pression  $p$  (en millimètres de mercure) peut être trouvée avec une exactitude de quelques millièmes de degré, dans tout le domaine compris entre  $p = 680^{\text{mm}}$  et  $p = 780^{\text{mm}}$ , au moyen de la formule

$$t_p = t_{760} + 12,6 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 6,5 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2.$$

2. *Point de fusion de la glace.* — On obtient la température de la glace fondante, comme la température à laquelle de la glace divisée en menus morceaux se trouve en équilibre avec de l'eau pure et saturée d'air sous la pression atmosphérique normale. L'effet d'une augmentation de pression est d'abaisser le point de congélation de 0,007 degré par atmosphère.

3. *Point d'ébullition de l'eau.* — La température d'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur est réalisée très simplement par la méthode dynamique, le thermomètre étant placé dans la vapeur saturante. Des hypsomètres de différents types ont été utilisés avec succès, en particulier l'hypsomètre du type Chappuis. Si la pression de la vapeur est transmise à l'appareil qui mesure la pression par de l'air, l'hypsomètre doit être disposé de façon à tenir compte du fait que la densité de l'air est plus grande

que celle de la vapeur d'eau. Si la pression est transmise au moyen d'hélium, un hypsomètre constitué par un tube de verre calorifugé, fermé à la partie inférieure, chauffé par le bas, présentant à sa partie supérieure un condenseur refroidi par de la glace, et muni d'un écran semblable à celui dont l'usage est recommandé pour l'étalonnage au point du soufre, a été trouvé très satisfaisant.

L'hypsomètre doit être disposé de façon que soient évitées une surchauffe de la vapeur autour du thermomètre et une contamination par l'air ou par d'autres impuretés. Lorsque la température d'équilibre correspondant à la pression a été atteinte, la température observée doit être indépendante du temps écoulé, de la vitesse avec laquelle la chaleur est fournie à l'hypsomètre, et de la profondeur d'immersion du thermomètre, si ce n'est dans la mesure où se produisent simultanément des changements de pression de la vapeur qui entoure la résistance de platine.

Il est recommandé de faire les mesures sous une pression aussi voisine que possible de  $p = 760^{\text{mm}}$  de mercure, en utilisant au besoin une atmosphère artificielle. Pour conserver une exactitude d'environ 0,001 degré dans tout le domaine compris entre  $p = 660^{\text{mm}}$  et  $p = 860^{\text{mm}}$ , on peut utiliser la formule ci-dessous :

$$t_p = t_{760} + 36,8578 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 20,159 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2 + 16,21 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^3.$$

En dehors de ce domaine de pression, la formule suivante doit être préférée :

$$t_p = \frac{326}{1 - 0,197864 \log_{10} \frac{p}{760}} - 226.$$

4. *Point d'ébullition du soufre.* — Dans le but d'étalonner des thermomètres à résistance, on réalise la température d'équilibre entre le soufre liquide et sa vapeur en se soumettant aux spécifications suivantes, relatives à la pureté du soufre, à l'appareil à point d'ébullition, à l'écran contre le rayonnement et au mode opératoire.

Le soufre ne devrait pas contenir plus de 0,02 pour 100 d'impuretés. Le sélénium est l'impureté dont la présence est la plus probable en quantité suffisante pour affecter la température d'équilibre d'un écart notable.

Le soufre est contenu dans un tube de verre, de silice fondue ou d'une substance analogue, et qui a un diamètre intérieur de 4<sup>cm</sup> au moins et de 6<sup>cm</sup> au plus. La longueur du tube est déterminée par la considération que la colonne de vapeur doit être assez longue pour être adaptée à l'écran contre le rayonnement et pour permettre les déplacements verticaux requis du thermomètre à résistance. Le chauffage électrique est préférable. La source de chaleur et toute matière de haute conductivité thermique en contact avec la source devraient se terminer au moins à 4<sup>cm</sup> au-dessous de la surface libre du soufre liquide. Au-dessus de la source de chaleur, une longueur convenable du tube est entourée d'un isolant thermique. Tout dispositif utilisé pour fermer l'extrémité supérieure du tube doit avoir une ouverture pour la libre égalisation de la pression.

L'écran contre le rayonnement est formé d'une partie cylindrique, ouverte à l'extrémité inférieure, et surmontée d'une partie conique, cette dernière s'adaptant exactement au tube protecteur du thermomètre. La partie cylindrique est plus large de 1<sup>cm</sup>,5 à 2<sup>cm</sup>,5 en diamètre que le tube protecteur du thermomètre, et au moins 1<sup>cm</sup> plus petite en diamètre que l'intérieur du tube qui contient le

soufre. La partie cylindrique de l'écran doit dépasser d'au moins 1<sup>cm</sup>,5 chacune des extrémités du fil résistant de platine du thermomètre à résistance. On doit laisser de larges ouvertures entre le sommet de la partie cylindrique et le bas de la partie conique de l'écran contre le rayonnement, afin de permettre une libre circulation de la vapeur. La surface interne de l'écran doit être peu réfléchissante. L'écran peut être fait d'une feuille de métal ou de graphite.

Lorsqu'on étalonne un thermomètre, le soufre est chauffé à l'ébullition, et le chauffage est réglé de telle sorte que la ligne de condensation soit au moins 1<sup>cm</sup> au-dessus du sommet de l'isolant thermique. Le thermomètre avec ses écrans contre le rayonnement est plongé dans la vapeur. Le bas de l'écran ne doit pas être à moins de 6<sup>cm</sup> au-dessus de la surface libre du soufre liquide et son sommet à moins de 2<sup>cm</sup> au-dessous du sommet de l'isolant thermique qui entoure le tube à ébullition. Lorsque la ligne de condensation a atteint de nouveau le niveau requis, on procède à des observations simultanées de la résistance et de la pression. On doit alors déplacer le thermomètre verticalement d'une longueur au moins égale à celle de la bobine résistante de platine, et sa résistance ne doit pas changer d'une quantité équivalant à plus de 0,01 degré, compte tenu de tout changement concomitant de la pression. L'écran peut être maintenu à la même place, le thermomètre seul étant déplacé; on peut aussi déplacer à la fois le thermomètre et l'écran. L'étendue de la portion cylindrique de l'écran au delà des extrémités du fil résistant de platine, et les distances comprises d'une part entre la base de l'écran et la surface du soufre liquide et d'autre part entre le sommet de l'écran et le sommet de l'isolant thermique, ne doivent pas être inférieures aux minima recommandés, aussi

bien lorsque le thermomètre est dans sa position initiale qu'après son déplacement.

La température d'équilibre  $t_p$  qui correspond à une pression  $p$  (en millimètres de mercure) peut être trouvée avec une exactitude de quelques millièmes de degré dans tout le domaine qui s'étend de  $p = 660^{\text{mm}}$  à  $p = 860^{\text{mm}}$  au moyen de la formule

$$t_p = t_{760} + 90,8028 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 47,573 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2 + 43,61 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^3.$$

§. *Points de solidification de l'argent et de l'or.* —

Les données sur l'effet des impuretés les plus probables dans de l'argent ou de l'or soigneusement purifiés indiquent que l'addition de 0,01 pour 100 d'impureté métallique en poids à de l'argent pur ou de 0,005 pour 100 à de l'or pur ne change probablement pas le point de solidification de plus de 0,1 degré dans l'un et l'autre cas.

Pour l'étalonnage d'un couple thermoélectrique, le métal est contenu dans un creuset de graphite pur, de porcelaine réfractaire, ou d'une autre matière qui ne le contamine pas d'une façon appréciable.

L'argent, pendant la chauffe, doit être protégé contre l'entrée d'oxygène.

Le creuset et le métal sont placés dans un four électrique capable de chauffer son contenu à une température uniforme.

Le métal est fondu et amené à une température uniforme, quelques degrés au-dessus de son point de fusion; puis on le laisse refroidir lentement, le couple thermoélectrique y étant immergé, comme il est décrit au paragraphe suivant.

Le couple thermoélectrique, monté dans un tube de porcelaine comportant des isolateurs de porcelaine qui

séparent les deux fils, est immergé dans le métal en fusion à travers un trou ménagé au centre du couvercle du creuset.

La profondeur d'immersion doit être telle que la force électromotrice observée du couple thermoélectrique ne change pas de plus de 1 microvolt lorsque la profondeur de l'immersion est augmentée ou diminuée de 1<sup>cm</sup>. Au cours de la solidification, la force électromotrice doit rester constante, dans les limites de 1 microvolt pendant une durée d'au moins 5 minutes.

Comme variante d'exécution, au lieu de déplacer le couple pour s'assurer de l'absence d'influence des conditions extérieures sur la force électromotrice observée, on peut noter le point de solidification et le point de fusion, et si ceux-ci ne diffèrent pas de plus de 2 microvolts, le point de solidification observé peut être considéré comme satisfaisant.

6. *Le thermomètre étalon à résistance.* — Le fil de platine du thermomètre étalon à résistance doit être monté de telle sorte qu'il soit soumis à un minimum de contrainte mécanique, afin que les variations de longueur qui accompagnent les changements de température aient pour effet un minimum d'effort mécanique sur le fil de platine.

Le thermomètre dans son état définitif doit être recuit à une température qui ne soit pas inférieure à 450° C, s'il ne doit pas servir au-dessus du point du soufre, ou en tout cas à une température qui ne soit pas inférieure à la température la plus élevée à laquelle il doit être utilisé.

Il est recommandé d'utiliser dans la construction de la résistance un fil de platine dont le diamètre ne soit pas plus petit que 0<sup>mm</sup>,05 ni plus gros que 0<sup>mm</sup>,5. A chaque extrémité de ce fil sont soudés généralement deux conduc-

teurs, dont l'un amène le courant et l'autre sert de prise de potentiel.

Pour la commodité du calcul, l'équation

$$R_t = R_0(1 + A t + B t^2)$$

peut être mise sous la forme proposée par Callendar :

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} 100 + \delta \left( \frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100}$$

De même l'équation

$$R_t = R_0[1 + A t + B t^2 + C(t - 100) t^3]$$

peut être mise sous la forme sensiblement équivalente

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} 100 + \delta \left( \frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} + \beta \left( \frac{t}{100} - 1 \right) \left( \frac{t}{100} \right)^3$$

7. *Le couple thermoélectrique étalon.* — Il est recommandé d'utiliser un couple thermoélectrique étalon fait d'un fil dont le diamètre ne soit pas plus petit que 0<sup>mm</sup>,35 ni plus gros que 0<sup>mm</sup>,65.

Le mode opératoire à observer, pour utiliser le point de solidification de l'antimoine comme température d'étalonnage, est essentiellement le même que celui qui a été spécifié pour l'argent. L'antimoine a une tendance marquée à rester en surfusion avant de se solidifier. La surfusion ne sera pas excessive, si l'on ne chauffe le métal que quelques degrés au-dessus de son point de fusion et si l'on agite le métal liquide. Au cours de la solidification, la température doit rester constante dans les limites de 0,1 degré pendant une durée d'au moins 5 minutes.

8. *Températures au-dessus du point de solidification de l'or.* — Pour la détermination des températures au moyen d'un pyromètre optique, la formule approxi-

mative suivante :

$$\log_e \frac{J_t}{J_{1063,0}} = \frac{C_2}{\lambda} \left[ \frac{1}{1336^\circ} - \frac{1}{(t + 273^\circ)} \right],$$

dans laquelle la constante  $C_2$  est égale à 1,432 cm.degré, fournira généralement des valeurs qui ne sont pas sensiblement différentes de celles que fournit la formule donnée dans la deuxième partie.

9. *Relation entre l'échelle Kelvin et l'échelle internationale de température.* — La différence entre une température exprimée dans l'échelle Kelvin et la même température exprimée dans l'échelle thermodynamique centigrade est la valeur numérique de  $T_0$ , point de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin. Comme les températures exprimées dans l'échelle internationale de température sont très approximativement les mêmes que les températures exprimées dans l'échelle thermodynamique centigrade, il est recommandé, lorsque des températures de l'échelle internationale de température doivent être exprimées dans l'échelle Kelvin, que l'on fasse usage de la relation  $T = t + T_0$ , et que, en vue d'assurer l'uniformité,  $T_0$  soit pris égal à  $273^\circ,15$ .

10. *Points secondaires.* — En plus des points fixes fondamentaux et primaires, on peut disposer d'un certain nombre d'autres points fixes, qui peuvent être utilisés dans l'étalonnage d'instruments secondaires de mesure de la température. Quelques-uns de ces points, ainsi que leur température dans l'échelle internationale de température, sont groupés dans le Tableau II. Les températures données sont celles qui correspondent à une pression de 760<sup>mm</sup> de mercure. Les formules donnant la variation de la tension de vapeur avec la température sont des-

tinées à être utilisées dans tout le domaine qui s'étend de  $p = 680^{\text{mm}}$  à  $p = 780^{\text{mm}}$ .

TABLEAU II.

*Points fixes secondaires sous la pression normale.*

	°C.
Température d'équilibre entre l'anhydride carbonique solide et sa vapeur.....	(int. 1939). —78,5
$t_p = t_{760} + 15,95 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 11 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2$	
Température de solidification du mercure.....	—38,87
Température de transition du sulfate de sodium décahydraté.....	32,38
Température de la vapeur de naphthalène saturante...	217,96
$t_p = t_{760} + 58,4 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 33 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2$	
Température de solidification de l'étain.....	231,85
Température de la vapeur de benzophénone saturante.	305,9
$t_p = t_{760} + 64,2 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 37 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2$	
Température de solidification du cadmium.....	320,9
Température de solidification du plomb.....	327,3
Température de solidification du zinc.....	419,5
Température de solidification de l'antimoine.....	630,5
Température de solidification du cuivre en atmosphère réductrice.....	1083
Température de solidification du nickel.....	1455
Température de solidification du palladium.....	1555
Température de solidification du platine.....	1773
Température de solidification du rhodium.....	1966
Température de solidification de l'iridium.....	2454
Température de fusion du tungstène.....	3400

ANNEXE T 4.

National Research Council (U. S. A.).

---

PROPOSITION

RELATIVE A LA DÉFINITION

DE

L'ÉCHELLE THERMODYNAMIQUE ABSOLUE.

(Lettre de M. F.-C. Brickwedde, Président du Comité des Échelles des Basses Températures du National Research Council, transmise par M. L.-J. Briggs, Directeur du National Bureau of Standards, à M. W.-H. Keesom, Président du Comité consultatif de Thermométrie, juillet 1939.

Dans l'avis de transmission, il a été spécifié que le Comité des Échelles des Basses Températures présentait cette question bien plutôt en vue d'une discussion, que dans le but de faire prendre une décision formelle à la réunion de cette année.)

---

J'ai reçu mission du Comité des Échelles des Basses Températures du National Research Council (U. S. A.), dont les membres sont les Professeurs J.-G. Aston, W.-F. Giauque, F.-G. Keyes, H.-C. Urey et le Dr. F.-G. Brickwedde, de prier le Comité consultatif de Thermométrie près le Comité international des Poids et Mesures, de mettre à son ordre du jour, pour la discuter à la réunion de juillet, la proposition suivante :

« L'échelle absolue thermodynamique des températures, « établie d'après l'équation  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2}$  qui relie les températures  $T_1$  « et  $T_2$  de deux états thermiques et les quantités de chaleur  $Q_1$  « et  $Q_2$  absorbées ou fournies par un moteur thermique parfait

« fonctionnant entre ces deux états selon un cycle de Carnot, a  
« jusqu'ici été fixée en rendant égal à 100° l'intervalle compris  
« entre les points de fusion de la glace et d'ébullition de l'eau. Il est  
« proposé de fixer maintenant cette échelle absolue thermodyna-  
« mique en assignant simplement une valeur numérique  $T_0$  au  
« point de fusion de la glace. Il est proposé également de choisir  
« la valeur numérique la *meilleure* connue à la date de l'adoption  
« de cette proposition pour la température de fusion de la glace  
« dans l'échelle Kelvin .»

L'adoption de cette proposition signifierait *en principe* l'abandon de l'échelle centigrade dans laquelle l'intervalle compris entre les points de fusion et de vaporisation de l'eau est 100° exactement, et réduirait le rôle du point d'ébullition de l'eau à celui des autres points fixes, tels par exemple que les points normaux d'ébullition du soufre et de l'oxygène, dont les températures sont déterminées par l'expérience. L'échelle pratique des températures ayant son zéro au point de fusion de la glace serait définie par l'équation  $t^\circ = T^\circ - T_0^\circ$ . Si l'on choisissait pour température de la glace fondante dans l'échelle Kelvin la « meilleure » valeur, la température d'ébullition de l'eau dans cette échelle pratique de température serait exactement 100° dans les limites de l'exactitude avec laquelle cette température peut être actuellement déterminée. Il est très improbable que, dans l'avenir, des mesures plus exactes conduisent, pour la température d'ébullition de l'eau dans l'échelle pratique, à des valeurs sortant des limites 99°,99 et 100°,01. Le fait que la température d'ébullition de l'eau dans l'échelle pratique ne serait pas 100° exactement n'aurait aucun inconvénient dans l'étalonnage des thermomètres, puisque ce n'est qu'accidentellement qu'on réalise la température normale d'ébullition de l'eau.

Trois des avantages que l'on gagnerait à adopter cette proposition seraient les suivants :

1° On fixerait par définition la relation entre les températures de l'échelle absolue thermodynamique et l'échelle pratique ayant son zéro au point de fusion de la glace. Actuellement, la relation entre les échelles Kelvin et centigrade doit être déterminée par l'expérience, et n'est par suite pas connue de façon certaine. De nouvelles déterminations de la température de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin conduisent à de nouvelles valeurs pour les

températures absolues de tous les points fixes. De même, de nouvelles déterminations des coefficients fondamentaux de pression et de volume d'un gaz employé dans les thermomètres à gaz conduisent à de nouvelles valeurs de toutes les températures sur les échelles centigrade et Kelvin déterminées au moyen de ce gaz. Il s'ensuit que sont apparues une confusion et des incertitudes dans les valeurs des températures des points fixes, incertitudes qui n'étaient pas inhérentes aux mesures originales de ces températures, mais à la conversion de celles-ci d'une échelle dans l'autre. Dans le cas de points fixes à basses températures, cela présente une importance considérable.

2<sup>o</sup> Les mesures de température faites au thermomètre à gaz peuvent être rendues plus exactes dans l'échelle proposée que dans les échelles centigrades actuelles, excepté au voisinage des points de fusion de la glace et d'ébullition de l'eau dans l'échelle Celsius. Cette exactitude plus grande provient de ce qu'une détermination de la température dans l'échelle proposée n'implique que des mesures faites au point de fusion de la glace et à la température inconnue; actuellement, au contraire, on doit faire aussi une mesure au point d'ébullition de l'eau, ou bien on doit admettre les résultats des mesures faites par autrui au point d'ébullition. [La pression  $p$  d'un thermomètre à gaz parfait serait, dans l'échelle proposée, reliée à la température absolue par l'équation  $T = \frac{p}{p_0} T_0$ , dans laquelle  $p_0$  est la pression du gaz au point de fusion de la glace, et  $T_0$  est la valeur numérique assignée à cette température.]

3<sup>o</sup> Comme il ne serait pas nécessaire de faire des mesures au point d'ébullition de l'eau pour déterminer des températures dans l'échelle proposée, l'usage du thermomètre à gaz serait rendu plus simple et plus commode.

Le Comité des Échelles des Basses Températures croit que les objections les plus sérieuses à l'adoption de la proposition sont les suivantes :

1<sup>o</sup> Elle revient à abandonner le point 100<sup>o</sup> de l'échelle centigrade, en fixant par définition une température. Toutefois, comme on l'a déjà signalé, cela n'entraînerait aucune gêne dans l'étalonnage des thermomètres, puisque la température normale d'ébullition de l'eau n'est jamais exactement réalisée, si ce n'est

accidentellement. La température d'ébullition de l'eau dans l'échelle internationale serait fixée exactement de la même façon que sont déjà fixées les températures d'ébullition du soufre et de l'oxygène. Ceci entraîne la possibilité de faire des erreurs dans le choix de cette température. Pour établir les tables de pression de vapeur, il peut paraître avantageux de rendre la pression de vapeur de l'eau exprimable exactement par un nombre simple à 100°. Toutefois, ce n'est que lorsque la pression s'exprime au moyen d'une colonne de mercure mesurée en unités métriques, que la pression de vapeur à 100° C est un nombre exact.

On a déjà signalé que tant que les mesures faites au thermomètre à gaz n'auront pu être rendues plus précises, la température d'ébullition de l'eau demeurera exactement égale à 100° dans la nouvelle échelle pratique aux limites près de nos connaissances actuelles.

2° Le changement de la définition de l'échelle de mesure pour une propriété aussi importante que la température ne peut manquer de provoquer quelques inconvénients. Cela signifierait pour beaucoup l'obligation d'apprendre de nouvelles définitions, et les livres classiques actuels ne seraient plus conformes à la définition de l'échelle des températures. Ces inconvénients seront très réduits, si la nouvelle définition choisie ne change pas sensiblement la température du point d'ébullition de l'eau.

Le Comité des Échelles des Basses Températures du National Research Council (U. S. A.) est d'avis que les avantages à retirer de l'adoption de la définition proposée pour l'échelle des températures l'emporteraient sur les inconvénients qui résulteraient d'un changement. Le Comité croit donc que la proposition mérite une étude attentive.

Le Comité des Échelles des Basses températures se rend compte que le délai précédant la réunion en juillet du Comité consultatif de Thermométrie est trop court pour permettre une étude appropriée de la proposition; par suite, il suggère qu'aucune résolution ne soit prise à la prochaine réunion du Comité consultatif. Le Comité des Échelles des Basses Températures pense cependant que, puisque le choix et l'adoption d'une valeur pour la température de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin sont actuellement à l'ordre du jour du Comité consultatif, la définition proposée

pour l'échelle thermodynamique devrait être examinée en même temps. Le Comité des Échelles des Basses Températures est également d'avis qu'en soumettant dès maintenant cette proposition au Comité consultatif de Thermométrie, on aura le temps de l'examiner soigneusement avant une réunion ultérieure du Comité consultatif, et qu'on aura ainsi permis à l'opinion générale de se prononcer à son égard.

---

ANNEXE T 2.

National Bureau of Standards.

---

PROJET

D'UNE

ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE

DE 1939.

Lettre adressée le 18 février 1939 à M. A. Pérard, Directeur du Bureau international des Poids et Mesures, par M. L.-J. Briggs, Directeur du National Bureau of Standards. (Extrait.)

---

L'échelle internationale de température adoptée en 1927 par la Septième Conférence générale des Poids et Mesures, ayant été laissée à peu près inchangée par les minimes révisions apportées dans la rédaction du texte en 1933, est maintenant en vigueur depuis quelque douze ans. Pendant cette période le National Bureau of Standards a utilisé cette échelle, autant pour les contrôles des instruments de mesure de température que pour la publication des résultats de ses recherches. D'après notre expérience, la méthode générale utilisée pour définir l'échelle et les procédés expérimentaux recommandés sont éminemment satisfaisants, et l'usage pratiquement universel de l'échelle a éliminé presque entièrement les anciennes incertitudes sur la signification des valeurs numériques de la température dans le domaine qui s'étend au-dessus de  $-190^{\circ}\text{C}$ .

La réunion de la Neuvième Conférence générale offrira cette année l'occasion de faire la révision de l'échelle en vue de tenir compte de résultats mis en évidence depuis 1927, et d'introduire

les améliorations suggérées par l'expérience acquise au cours de l'utilisation de l'échelle. Nous soumettons en conséquence nos suggestions pour les changements que nous considérons comme désirables. Pour bien préciser ces propositions, on les a mises sous la forme d'un projet d'échelle révisée, accompagné d'un mémorandum justificatif.

Nous espérons que tous les laboratoires représentés au Comité Consultatif de Thermométrie, laboratoires auxquels des exemplaires du projet et du mémorandum ont été envoyés, présenteront des commentaires, des amendements ou d'autres propositions, et qu'un projet qui sera acceptable pourra être soumis au Comité Consultatif, lors de ses réunions en juin ou juillet 1939.

## MÉMORANDUM SUR LE PROJET DE RÉDACTION.

La différence la plus importante entre le projet ci-après et le texte de l'échelle de 1927 réside dans la présentation. Il a semblé que certaines allégations expliquant la nécessité et le but de l'échelle ne devraient pas être incluses dans la définition de l'échelle. On les a mises en conséquence dans une introduction qui constitue la première Partie du projet ci-joint. La deuxième Partie est la « Définition de l'échelle internationale de température de 1939 ». D'autres points qui paraissaient se grouper d'une façon plus naturelle sous le titre « Modes opératoires recommandés et renseignements complémentaires », ont été transférés sous ce titre dans une troisième Partie.

Nous ne proposons que trois changements qui affectent les valeurs numériques de la température. L'un est la substitution de 1,436 cm.deg à 1,432 cm.deg, accompagnée de la substitution de la loi de Planck à la loi de Wien, dans la définition de l'échelle au-dessus de 1063°,0C. Un autre changement est de placer la limite supérieure de la partie de l'échelle fondée sur le thermomètre étalon à résistance au point de solidification de l'antimoine et non plus à 660°C. Le troisième changement est une modification dans la formule d'interpolation à utiliser avec le thermocouple étalon, accompagnée d'un changement de la température du point de l'argent, porté de 960°,5 à 960°,7.

Les raisons qui nous ont incités à suggérer ces trois changements vont être données brièvement. Les raisons de la plupart des autres changements, qui n'affectent en grande partie que la réduction et répondent surtout à un désir de concision et d'uniformité dans l'expression, apparaîtront par l'étude du projet lui-même. En établissant ce projet nous avons pris en considération, autant qu'il nous a paru possible, les critiques et les commentaires relatifs à l'échelle de 1927.

Dans l'échelle de 1927, on a fait coïncider le thermocouple étalon et le thermomètre à résistance étalon au point de solidification de l'antimoine, soit environ  $630^{\circ},5\text{C}$ , mais la concordance à  $660^{\circ}\text{C}$  a été laissée au hasard. Ceci conduit à une anomalie que l'on peut illustrer au mieux par le fait que le point de fusion de l'aluminium pur ne peut pas être exprimé dans l'échelle de 1927. Lorsqu'on le détermine avec un thermomètre étalon à résistance, on le trouve au-dessus de  $660^{\circ}\text{C}$ , et par conséquent en dehors du domaine de l'échelle fondée sur cet instrument. Cependant lorsque cette même température est mesurée avec un thermocouple étalon, on la trouve au-dessous de  $660^{\circ}\text{C}$ , et par conséquent en dehors du domaine fondé sur le thermocouple étalon. Nous avons fait quelques mesures très soignées qui indiquent que la grandeur de cette anomalie est  $0,15$  degré.

En faisant de la température du point de solidification de l'antimoine l'un des points où l'échelle est fractionnée, on supprime l'anomalie mentionnée ci-dessus. Mais, à moins que l'on ne change de quelque façon la formule utilisée pour l'interpolation avec le thermocouple, les écarts entre la présente échelle et l'échelle Kelvin n'auraient pas une allure continue dans la région du point de fractionnement. En d'autres termes, les propriétés de substances qui sont régulières et continues dans leurs variations avec la température dans l'échelle Kelvin ne le seront pas lorsqu'on les exprimera en fonction de la température de l'échelle internationale. A titre d'exemple, la valeur de  $\frac{de}{dt}$  d'un thermocouple étalon aura une légère discontinuité au point de fractionnement de l'échelle. Une discontinuité semblable, mais plus petite, a été trouvée au point de l'or, autre point de partage de l'échelle.

Diverses formules d'interpolation pour le thermocouple ont été examinées en vue d'en trouver une qui aurait les

valeurs requises de  $\frac{de}{dt}$  aussi bien à 630° qu'à 1063°. On a constaté que l'expression du 3<sup>e</sup> degré assez simple donnée dans le projet fournira les résultats cherchés si la température de définition du point de l'argent est portée de 960°,5 à 960°,7. Un tel changement est bien dans le domaine d'incertitude de la position du point de l'argent sur l'échelle thermodynamique centigrade. Il y a, de plus, une quantité considérable d'expériences, comprenant des mesures au thermomètre à gaz, qui indique que la différence entre les températures de solidification de l'or et de l'argent est probablement inférieure à 102,5 degrés. Puisque la température du point de l'or est fixée à 1063°, le choix de la valeur 960°,7 pour la température du point de l'argent est en accord avec les données de l'expérience. Des mesures au pyromètre optique, dans lesquelles on adopte pour  $C_2$  la valeur 1,436 cm.deg et pour le point de l'or la température 1063°,0, conduisent à 960°,7 pour le point de l'argent.

L'adoption de la formule d'interpolation donnée dans le projet et la fixation de la température du point de l'argent à 960°,7 apporteront les avantages suivants :

1<sup>o</sup> Le thermomètre à résistance et le thermocouple seraient amenés en concordance très étroite au voisinage du point de solidification de l'antimoine, et en particulier au point de solidification de l'aluminium.

2<sup>o</sup> L'échelle du thermocouple et l'échelle du pyromètre optique (avec  $C_2 = 1,436$  cm.deg) seraient amenées en concordance très étroite au voisinage du point de l'or, et en particulier aux points de solidification de l'argent, 960°,7 C et du cuivre, 1083°,1 C.

3<sup>o</sup> L'échelle modifiée ne s'écarte pas de l'échelle de 1927 de plus de 0,4 degré entre 630° et 1063° C.

Les données détaillées sur lesquelles ont été fondées les conclusions ci-dessus seront publiées dans un avenir prochain (Annexe T 3).

L'avantage d'utiliser la formule de Planck au lieu de la formule de Wien ne demande que peu d'explications; il est exposé dans la première Partie du projet. Cet emploi n'impliquera aucun calcul supplémentaire pour l'utilisation de l'échelle, puisque la formule approximative pour  $t_a$  donnée dans la troisième Partie sera probablement utilisée pour toutes les températures du domaine couvert par l'échelle de 1927.

Le changement de la valeur de  $C_2$  produit des changements sensibles sur l'échelle. Nous avons été amenés à cette valeur  $C_2 = 1,436$  cm.deg après un examen détaillé de toutes les données à notre disposition. Une Note où l'on discute ce choix paraîtra prochainement (*Voir Annexe T 4, p. T 88*). En résumé les valeurs de  $C_2$  auxquelles on arrive par quatre voies différentes sont les suivantes :

Origine.	Valeur de $C_2$ , cm.degré.
Pyrométrie optique.....	1,436 <sub>1</sub>
Mesure de $\lambda_{\max} T$ .....	1,436 <sub>1</sub>
Mesure de $\sigma$ .....	1,436 <sub>8</sub>
Physique atomique.....	<u>1,435<sub>8</sub></u>
Moyenne pondérée.....	1,436

Les valeurs obtenues par pyrométrie optique sont basées sur des rapports de brillance mesurés au pyromètre optique et des valeurs de la température sur l'échelle thermodynamique déterminées soit au thermomètre à gaz, soit — dans un cas — au pyromètre à rayonnement. Cette dernière détermination ne fournissait évidemment que le rapport de deux températures, à savoir celle du point du palladium et celle du point de l'or.

La valeur 273,16 proposée pour  $T_0$  concorde, pensons-nous, à 0,01 degré près avec toute valeur susceptible de rencontrer une approbation générale.

Les valeurs qui ont été prises en considération pour arriver au choix de 273,16 sont les suivantes :

*Valeurs de  $T_0$ .*

Auteurs.	Laboratoires.	Date.	$T_0$ .
Heuse et Otto.	P. T. R.	1930	273,16
Keesom et Tuyn.	Leyde.	1936	273,14 <sub>4</sub>
Røebuck.	Univ. de Wisconsin.	1936	273,16
Kinoshita et Oishi.	Univ. de Tokio.	1937	<u>273,16<sub>7</sub></u>
	Moyenne.....		273,16

Dans le Tableau 3, « Points fixes secondaires », la température du point de  $CO_2$  a été donnée à  $-78^{\circ},51C$ , ce qui paraît être la meilleure valeur dans l'échelle internationale de tempé-

rature. De même le point de solidification du mercure est donné à  $-38^{\circ},86$ . La valeur  $-38^{\circ},87$  dans l'échelle de 1927 correspond à la température déterminée avec le thermomètre à résistance et la formule originale de Callendar. La valeur correspondante lorsqu'on utilise la formule de la deuxième Partie, 4(b), est  $-38^{\circ},86$ . La température de solidification du zinc a été arrondie à  $419^{\circ},5$ . Des valeurs observées récemment s'échelonnent de  $419^{\circ},48$  à  $419^{\circ},52$ .

Un grand nombre de résultats semble montrer que la différence entre le point de solidification du cuivre et celui de l'or est plus grande que 20,0 degrés. Comme la température de définition du point de solidification de l'or est fixée à  $1063^{\circ},0$ , on a fixé le point de solidification du cuivre à  $1083^{\circ},1$  pour les raisons déjà mentionnées.

Les points fixes au-dessus du point de solidification du cuivre ont été exprimés dans l'échelle de température internationale proposée, et les valeurs correspondantes sont inscrites au Tableau 3. Comme quelques valeurs de l'échelle ont été arrondies, les différences entre ces valeurs et celles qui sont proposées ne correspondent pas exactement à la différence entre les deux échelles.

Les formules du Tableau 3 pour la variation de la pression de vapeur avec la température ont une histoire curieuse. Pendant l'année 1927, dans la correspondance préliminaire entre les différents laboratoires, ces formules ainsi que celles qui concernent les points fixes fondamentaux ont été données sous la forme logarithmique. Juste avant de soumettre le texte de l'échelle proposée au Comité international et à la Septième Conférence générale, on a mis sous la forme parabolique les formules pour les points fixes fondamentaux; mais la modification correspondante des formules pour les points fixes secondaires n'a pas été faite. C'est pourquoi, en 1933, nous avons recommandé, à titre de changement de rédaction, que les formules pour les points fixes secondaires soient mises sous la forme parabolique. En 1933 pourtant ces formules, telles qu'elles ont été adoptées, sont sous la forme linéaire, qui est tout à fait mal appropriée. Nous recommandons par conséquent que les équations soient mises maintenant sous la forme parabolique.

La forme logarithmique de telles équations est applicable dans un intervalle plus étendu que la forme parabolique, et doit être préférée en général. La forme logarithmique ayant été sommai-

rement rejetée en 1927, nous n'avons pas recommandé de revenir à cette forme; mais si les autres Laboratoires sont maintenant en faveur d'un tel changement, nous serions nous-mêmes prêts à l'appuyer.

Dans le projet, on n'a modifié en rien l'échelle au-dessous du point de solidification de l'antimoine. Nous ne connaissons aucune donnée sur laquelle puisse s'appuyer un changement dans le domaine compris entre le point de fusion de la glace et le point de solidification de l'antimoine. La partie de l'échelle au-dessous du point de fusion de la glace a été le sujet de plusieurs recherches, et il y a des indications tendant à mettre en évidence de petites différences entre l'échelle de température internationale et l'échelle thermodynamique centigrade. Ces recherches n'ont pas encore mis en lumière la forme que devrait prendre une révision pratique de l'échelle. Et pour cette raison nous ne proposons aucune modification. Il ne paraît pas exister actuellement de moyen pratique pour étendre l'échelle aux températures inférieures à  $-190^{\circ}$ .

## PROJET DE RÉDACTION DE L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE DE 1939.

### PREMIÈRE PARTIE.

#### INTRODUCTION.

L'échelle Kelvin, dans laquelle les températures sont désignées par  $^{\circ}\text{K}$  et identifiées par le symbole  $T$ , est reconnue comme l'échelle fondamentale à laquelle toute mesure de température devrait pouvoir se rapporter finalement. Dans cette échelle thermodynamique, l'intervalle compris entre la température de la glace fondante,  $T_0$ , et la température de la vapeur d'eau saturante, l'une et l'autre sous la pression d'une atmosphère normale, est 100 degrés. Par la présente déclaration, la Neuvième Conférence générale des Poids et Mesures adopte cette échelle, ainsi que l'Échelle Thermodynamique Centigrade dans laquelle la température est égale à  $T - T_0$ . Tout intervalle de température

exprimé dans l'une de ces échelles aura la même valeur numérique que lorsqu'on l'exprimera dans l'autre.

Les difficultés expérimentales inhérentes aux mesures de température dans toute l'échelle thermodynamique ont conduit à l'adoption en 1927, par la Septième Conférence générale des Poids et Mesures, d'une échelle pratique qui a été désignée sous le nom d' « Échelle Internationale de Température ». Cette échelle s'accordait avec l'Échelle Thermodynamique Centigrade aussi étroitement qu'il était possible dans l'état des connaissances à cette époque. Elle fut établie de façon qu'elle fût aisément et exactement reproductible, et qu'elle fournît la possibilité de spécifier d'une façon univoque toute température comprise dans le domaine de l'échelle.

L'échelle définie ci-dessous a été établie en vue de réaliser une concordance plus étroite avec l'Échelle Thermodynamique Centigrade que celle obtenue au moyen de l'échelle adoptée en 1927, dont ceci constitue la première révision.

Les modes opératoires par lesquels on devra réaliser l'échelle sont en substance inchangés. Les révisions dans la définition de l'échelle qui ont pour conséquence des changements de la valeur numérique assignée à une température sont : *a*, une subdivision de l'échelle au point de solidification de l'antimoine au lieu de 660°C; *b*, un changement de la valeur assignée au point de l'argent, accompagné de l'utilisation d'une formule d'interpolation différente pour le thermocouple étalon; *c*, la définition de l'échelle au-dessus du point de solidification de l'or en fonction de la formule du rayonnement de Planck, avec des constantes numériques différentes, au lieu de la formule de Wien. Il n'y a pas de limite supérieure aux températures ainsi définies.

Jusqu'à 630°C, l'échelle définie est identique à l'échelle de 1927, et jusqu'à 1200°C, les différences n'excèdent pas 0,4 degré. Entre 630° et 1063°C, les valeurs numériques de la température dans cette échelle sont plus fortes que celles de l'échelle de 1927, la différence maximum étant 0,40 degré à 800°C environ.

Les températures dans l'Échelle Internationale de Température de 1927 étaient désignées par « °C » ou « °C (Int.) ». Comme la désignation « °C » est conservée dans cette révision, elle devrait être appliquée à l'avenir aux températures exprimées dans la dernière échelle adoptée avant l'époque à laquelle la désignation est utilisée. Là où quelque doute pourrait surgir, l'année de l'adoption devrait être aussi spécifiée.

DEUXIÈME PARTIE.

DÉFINITION DE L'ÉCHELLE INTERNATIONALE  
DE TEMPÉRATURE DE 1939.

1. Les températures dans l'Échelle Internationale de Température de 1939 seront désignées par « °C » ou « °C (Int. 1939) » et représentées par le symbole  $t$ .

2. L'échelle est fondée sur un certain nombre de températures d'équilibres fixes et reproductibles, ou points fixes, auxquelles sont assignées des valeurs numériques, et sur des formules spécifiques établissant la relation entre la température et les indications des instruments étalonnés au moyen de ces points fixes.

3. Les points fixes fondamentaux et la valeur numérique assignée à chacun d'eux sont donnés dans le Tableau 1. Dans chaque cas, ces valeurs définissent la température d'équilibre lorsque la pression est  $1,01325 \cdot 10^6$  dynes/cm<sup>2</sup>, ce qui correspond à une hauteur barométrique de 760<sup>mm</sup> à 0°C pour  $g = 980,665$  cm/sec<sup>2</sup>.

TABLEAU 1.

*Points fixes fondamentaux à une pression  
de  $1,01325 \cdot 10^6$  dynes/cm<sup>2</sup>.*

	Température ° C.
<i>a.</i> Température d'équilibre entre l'oxygène liquide et sa vapeur (point d'ébullition de l'oxygène).	— 182,97
<i>b.</i> Température d'équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air (point de fusion de la glace)...	0,000
<i>c.</i> Température d'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur (point d'ébullition de l'eau).....	100,000
<i>d.</i> Température d'équilibre entre le soufre liquide et sa vapeur (point d'ébullition du soufre)...	444,60
<i>e.</i> Température d'équilibre entre l'argent solide et l'argent liquide (point de solidification de l'argent).....	960,7
<i>f.</i> Température d'équilibre entre l'or solide et l'or liquide (point de solidification de l'or).....	1063,0

4. Les procédés d'interpolation conduisent à un partage de l'échelle en quatre régions.

a. Du point de fusion de la glace au point de solidification de l'antimoine la température  $t$  est définie par la formule

$$R_t = R_0(1 + A t + B t^2),$$

dans laquelle  $R_t$  est la résistance à la température  $t$  d'un fil de platine entre les points de bifurcation formés par la soudure du conducteur de courant et du conducteur de potentiel d'un thermomètre étalon à résistance. Les constantes  $R_0$ ,  $A$  et  $B$  sont déterminées par des comparaisons au point de fusion de la glace et aux points d'ébullition de l'eau et du soufre. Pour un thermomètre étalon à résistance, le rapport  $\frac{R_{100}}{R_0}$  ne doit pas être inférieur à 1,390,

et le rapport  $\frac{R_{111,00} - R_0}{R_{100} - R_0}$  doit être compris entre 4,216 et 4,218.

b. De  $-190^\circ\text{C}$  au point de fusion de la glace, la température  $t$  est définie par la formule

$$R_t = R_0[1 + A t + B t^2 + C(t - 100)t^3],$$

dans laquelle  $R_t$  a la signification spécifiée ci-dessus, la constante  $C$  étant calculée à partir de la valeur mesurée de  $R_t$  au point d'ébullition de l'oxygène, après que les trois autres constantes ont été déterminées comme il est spécifié au paragraphe a.

En plus des conditions énoncées au paragraphe a, le rapport  $\frac{R_0 - R_{-182,97}}{R_{100} - R_0}$  doit être compris entre 1,925 et 1,928 pour un thermomètre étalon à résistance destiné à être utilisé au-dessous du point de fusion de la glace.

c. Du point de solidification de l'antimoine au point de solidification de l'or, la température  $t$  est définie par la formule

$$e = -200 + at + bt^2 + ct^3,$$

dans laquelle  $e$  est la force électromotrice, en microvolts, d'un thermocouple étalon de platine et platine rhodié, lorsque l'une des soudures est à  $0^\circ\text{C}$  et l'autre à la température  $t$ . Les constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  doivent être calculées à partir des

valeurs mesurées de  $e$  au point de solidification de l'antimoine, au point de solidification de l'argent et au point de solidification de l'or. Dans la détermination de ces constantes, la température que l'on doit assigner au point de solidification de l'antimoine utilisé est la valeur déterminée pour cet échantillon particulier avec un thermomètre étalon à résistance, de la façon spécifiée au paragraphe 4a. L'antimoine utilisé doit avoir un point de solidification qui ne soit pas inférieur à 630°,3 C.

Le platine du thermocouple étalon sera d'une pureté telle que le rapport  $\frac{R_{100}}{R_0}$  ne soit pas inférieur à 1,390. Le fil d'alliage doit contenir 90 pour 100 de platine et 10 pour 100 de rhodium en poids. Le thermocouple sous sa forme définitive doit développer une force électromotrice comprise entre 10200 et 10400 microvolts lorsque l'une des soudures est au point de fusion de la glace et l'autre au point de solidification de l'or.

d. Au-dessus du point de solidification de l'or, 1063°,0 C, la température  $t$  est définie par la formule

$$\frac{J_t}{J_{1063.0}} = \frac{\frac{1,436}{e^{4336,16\lambda} - 1}}{\frac{1,436}{e^{(\lambda + 273,15)\lambda} - 1}},$$

dans laquelle :  $\lambda$  est une longueur d'onde, en centimètres, du spectre visible,  $e$  est la base des logarithmes népériens, et  $J_t$  est l'énergie de rayonnement (de longueur d'onde  $\lambda$ ) par intervalle unité de longueur d'onde, émise en une unité de temps par l'unité d'aire d'un corps noir à la température  $t$ .

### TROISIÈME PARTIE.

#### MODES OPÉRATOIRES RECOMMANDÉS ET RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES.

Chacun des points fixes fondamentaux est donné comme étant la température d'équilibre sous une pression de 1,01325.10<sup>6</sup> dynes/cm<sup>2</sup>. En étalonnant un thermomètre à résistance ou un thermocouple à ces points fixes, il est nécessaire que la partie sensible de l'instrument de mesure soit amenée aussi près que possible de la température d'équilibre.

La température d'équilibre entre un liquide et sa vapeur varie notablement avec la pression. La pression de  $1,01325 \cdot 10^6$  dynes/cm<sup>2</sup> correspond à la pression exercée par une colonne de mercure de 760<sup>mm</sup>, soumise à une attraction de pesanteur de 980,665 dynes/gramme, et ayant une masse spécifique de 13,5951 grammes/cm<sup>3</sup>, valeur admise pour la masse spécifique du mercure ordinaire pur à 0° C sous la pression moyenne existant dans une telle colonne de mercure.

Dans les paragraphes suivants concernant les points fixes, le dispositif expérimental et le mode opératoire recommandés sont ceux que l'expérience a montré satisfaisants. Lorsque la température d'équilibre dépend de la pression dans une mesure appréciable, des formules représentant la relation entre la pression et la température d'équilibre sont données. Comme ces formules ne sont pas exactes, il est désirable que les températures d'équilibre réalisées expérimentalement s'approchent de celles qui sont définies dans la deuxième Partie, puisque tout écart à partir de la pression spécifiée introduit une incertitude qui augmente avec la grandeur de l'écart. Dans les formules donnant la variation de la température d'équilibre entre un liquide et sa vapeur, la pression dans la région où le fil résistant de platine est logé est celle qui doit être utilisée pour calculer la température correspondant à  $R_i$ .

1. *Le point d'ébullition de l'oxygène.* — La température d'équilibre entre l'oxygène liquide et sa vapeur est réalisée expérimentalement au mieux par la méthode statique. Le thermomètre étalon à résistance et la surface libre de l'oxygène liquide dans son récipient sont amenés à la même température dans un cryostat convenable, qui peut être par exemple un bain bien agité d'oxygène liquide (cet oxygène n'a pas besoin d'être de grande pureté), ou un bloc de métal dans un tel bain. Le tube qui relie l'espace contenant l'oxygène liquide pur au manomètre utilisé pour la mesure de la pression de vapeur devrait être protégé contre des températures inférieures à la température de l'oxygène liquide pur à l'endroit où se trouve le fil résistant du thermomètre étalon. La température à la surface d'un bain d'oxygène liquide peut être sensiblement plus basse qu'en des points situés à l'intérieur du bain.

La température d'équilibre  $t_p$  correspondant à une pression  $p$  (en millimètres de mercure) peut être trouvée avec une exacti-

tude de quelques millièmes de degré dans tout le domaine compris entre  $p = 680^{\text{mm}}$  et  $p = 780^{\text{mm}}$  au moyen de la formule

$$t_p = t_{760} + 12,6 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 6,5 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2.$$

2. *Le point de fusion de la glace.* — La température d'équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air se réalise simplement dans un mélange de glace finement divisée et d'eau saturée d'air dans un vase bien isolé tel qu'un vase de Dewar. En observant quelques précautions concernant la pureté de la glace et de l'eau, la saturation de l'eau par l'air et l'effet de la pression, on peut réaliser une température reproductible à mieux que 0,001 degré.

On peut calculer l'effet de la pression par la formule

$$t = -0,0098 \left( \frac{b - 760}{760} \right) - 0,0075 \frac{H}{13,6 \times 760},$$

dans laquelle  $t$  est la température d'équilibre,  $b$  est la pression barométrique ambiante (en millimètres de mercure) à laquelle l'eau est saturée par l'air,  $H$  est la profondeur en millimètres au-dessous de la surface du mélange glace et eau.

3. *Le point d'ébullition de l'eau.* — La température d'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur est réalisée très simplement par la méthode dynamique, le thermomètre étant placé dans la vapeur saturante. Des hypsomètres de différents types ont été utilisés avec succès. Si la pression de la vapeur est transmise à l'appareil qui mesure la pression par de l'air, l'hypsomètre doit être disposé de façon à tenir compte du fait que la densité de l'air est plus grande que celle de la vapeur d'eau. Si la pression est transmise au moyen d'hélium, un hypsomètre constitué par un tube de verre thermiquement isolé, fermé à la partie inférieure, chauffé par le bas, muni à sa partie supérieure d'un condenseur refroidi par de la glace, et protégé contre le rayonnement par l'adjonction d'un écran semblable à celui dont l'usage est recommandé pour l'étalonnage au point du soufre, a été trouvé très satisfaisant.

L'hypsomètre doit être disposé de façon que soient évitées une surchauffe de la vapeur autour du thermomètre, ou une contamination par l'air ou par d'autres impuretés. Lorsque la température d'équilibre correspondant à la pression a été atteinte, la tempé-

rature observée doit être indépendante du temps écoulé, de la vitesse avec laquelle la chaleur est fournie à l'hypsomètre, et de la profondeur d'immersion du thermomètre, si ce n'est dans la mesure où se produisent simultanément des changements de pression de la vapeur qui entoure la résistance de platine.

La température d'équilibre  $t$  correspondant à une pression  $p$  (en millimètres de mercure) peut être trouvée avec une exactitude d'environ 0,001 degré, dans tout le domaine compris entre  $p = 660$  et  $p = 860^{\text{mm}}$ , au moyen de l'une ou l'autre des formules

$$t_p = t_{760} + 36,8578 \left( \frac{p-760}{1000} \right) - 20,159 \left( \frac{p-760}{1000} \right)^2 + 16,21 \left( \frac{p-760}{1000} \right)^3$$

ou

$$t_p = \frac{326}{1 - 0,197864 \log_{10} \frac{p}{760}} - 226.$$

La seconde formule est à préférer en dehors du domaine mentionné ci-dessus.

4. *Le point d'ébullition du soufre.* — Dans le but d'établir des thermomètres à résistance, on réalise la température d'équilibre entre le soufre liquide et sa vapeur en se soumettant aux spécifications suivantes relatives à la pureté du soufre, à l'appareil à point d'ébullition, à l'écran contre le rayonnement et au mode opératoire.

Le soufre ne devrait pas contenir plus de 0,02 pour 100 d'impuretés. Le sélénium est l'impureté dont la présence est la plus probable en quantité suffisante pour affecter la température d'équilibre d'une façon notable.

Le soufre est contenu dans un tube de verre, de silice fondue ou d'une substance analogue, et qui a un diamètre intérieur de 4<sup>cm</sup> au moins et de 6<sup>cm</sup> au plus. La longueur du tube est déterminée par la considération que la colonne de vapeur doit être assez longue pour être adaptée à l'écran contre le rayonnement et pour permettre les déplacements verticaux requis du thermomètre à résistance. Le chauffage électrique est préférable. La source de chaleur et toute matière de haute conductivité thermique en contact avec la source devraient se terminer au moins à 4<sup>cm</sup> au-dessous de la surface libre du soufre liquide. Au-dessus de la source de chaleur, une longueur convenable du tube est entourée d'un isolant thermique. Tout dispositif utilisé pour

fermer l'extrémité supérieure du tube doit avoir une ouverture pour la libre égalisation de la pression.

L'écran contre le rayonnement est formé d'une partie cylindrique, ouverte à l'extrémité inférieure, et surmontée d'une partie conique, cette dernière s'adaptant exactement au tube protecteur du thermomètre. La partie cylindrique est plus large de 1<sup>cm</sup>,5 à 2<sup>cm</sup>,5 en diamètre que le tube protecteur du thermomètre, et au moins 1<sup>cm</sup> plus petite en diamètre que l'intérieur du tube qui contient le soufre. La partie cylindrique de l'écran doit dépasser d'au moins 1<sup>cm</sup>,5 chacune des extrémités du fil résistant de platine du thermomètre à résistance. On doit laisser de larges ouvertures entre le sommet de la partie cylindrique et le bas de la partie conique de l'écran contre le rayonnement, afin de permettre une libre circulation de la vapeur. La surface interne de l'écran doit être peu réfléchissante. L'écran peut être fait d'une feuille de métal ou de graphite.

Lorsqu'on étalonne un thermomètre, le soufre est chauffé à l'ébullition, et le chauffage est réglé de telle sorte que la ligne de condensation soit au moins 1<sup>cm</sup> au-dessus du sommet de l'isolant thermique. Le thermomètre avec ses écrans contre le rayonnement est plongé dans la vapeur. Le bas de l'écran ne doit pas être à moins de 6<sup>cm</sup> au-dessus de la surface libre du soufre liquide et son sommet à moins de 2<sup>cm</sup> au-dessus du sommet de l'isolant thermique qui entoure le tube à ébullition. Lorsque la ligne de condensation a atteint de nouveau le niveau requis, on procède à des observations simultanées de la résistance et de la pression. On doit alors déplacer le thermomètre verticalement d'une longueur au moins égale à celle de la bobine résistante de platine, et sa résistance ne doit pas changer d'une quantité équivalente à plus de 0,01 degré, compte tenu de tout changement concomitant de la pression. L'écran peut être maintenu à la même place, le thermomètre seul étant déplacé; on peut aussi déplacer à la fois le thermomètre et l'écran. L'étendue de la portion cylindrique de l'écran au delà des extrémités du fil résistant de platine et les distances comprises d'une part entre la base de l'écran et la surface du soufre liquide, et d'autre part entre le sommet de l'écran et le sommet de l'isolant thermique, ne doivent pas être inférieures aux minima recommandés, aussi bien lorsque le thermomètre est dans sa position initiale qu'après son déplacement.

La température d'équilibre  $t_p$  qui correspond à une pression  $p$

(en millimètres de mercure) peut être trouvée avec une exactitude de quelques millièmes de degré dans tout le domaine qui s'étend de  $p = 660^{\text{mm}}$  à  $p = 860^{\text{mm}}$  au moyen de la formule

$$t_p = t_{760} + 90,8028 \left( \frac{p-760}{1000} \right) - 47,573 \left( \frac{p-760}{1000} \right)^2 + 43,61 \left( \frac{p-760}{1000} \right)^3.$$

3. *Les points de solidification de l'argent et de l'or.* —

Les données sur l'effet des impuretés les plus probables dans de l'argent ou de l'or soigneusement purifiés indiquent que l'addition de 0,01 pour 100 d'impureté métallique en poids à de l'argent pur ou de 0,005 pour 100 à de l'or pur ne change probablement pas le point de solidification de plus de 0,1 degré dans l'un et l'autre cas.

Pour l'étalonnage d'un thermocouple, le métal est contenu dans un creuset de graphite pur, de porcelaine réfractaire, ou d'une autre matière qui ne le contamine pas d'une façon appréciable.

L'argent, pendant la chauffe, doit être protégé contre l'entrée d'oxygène.

Le creuset et le métal sont placés dans un four électrique capable de chauffer son contenu à une température uniforme.

Le métal est fondu et amené à une température uniforme quelques degrés au-dessus de son point de fusion, puis on le laisse refroidir lentement, le thermocouple y étant immergé comme il est décrit au paragraphe suivant.

Le thermocouple, monté dans un tube de porcelaine comportant des isolateurs de porcelaine qui séparent les deux fils, est immergé dans le métal en fusion à travers un trou ménagé au centre du couvercle du creuset.

La profondeur d'immersion doit être telle que la force électromotrice observée du thermocouple ne change pas de plus de 1 microvolt lorsque la profondeur de l'immersion est augmentée ou diminuée de 1<sup>cm</sup>. Pendant la solidification, la force électromotrice doit rester constante dans les limites de 1 microvolt pendant une durée d'au moins 5 minutes.

Comme variante d'exécution, au lieu de déplacer le couple pour s'assurer de l'absence d'influence des conditions extérieures sur la force électromotrice observée, on peut noter le point de solidification et le point de fusion, et si ceux-ci ne diffèrent pas

de plus de 2 microvolts, le point de solidification observé peut être considéré comme satisfaisant.

6. *Le thermomètre étalon à résistance.* — Le fil de platine du thermomètre étalon à résistance doit être monté de telle sorte qu'il soit soumis à un minimum de contrainte mécanique, afin que les variations de longueur qui accompagnent les changements de température aient pour effet un minimum d'effort mécanique sur le fil de platine.

Le thermomètre dans son état définitif doit être recuit à une température qui ne soit pas inférieure à 450° C. s'il ne doit pas servir au-dessus du point du soufre, ou en tout cas à une température qui ne soit pas inférieure à la température la plus élevée à laquelle il doit être utilisé.

Il est recommandé d'utiliser, dans la construction de la résistance, un fil de platine dont le diamètre ne soit pas plus petit que 0<sup>mm</sup>,05 ni plus gros que 0<sup>mm</sup>,5.

Pour la commodité du calcul, l'équation

$$R_t = R_0(1 + A t + B t^2)$$

peut être mise sous la forme proposée par Callendar

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} 100 + \delta \left( \frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100}.$$

Les spécifications données dans la deuxième Partie concernant les valeurs permises de  $\frac{R_{111,60} - R_0}{R_{100} - R_0}$  sont équivalentes à la prescription que la constante  $\delta$  soit comprise entre 1,488 et 1,501 degré.

De même l'équation

$$R_t = R_0 [1 + A t + B t^2 + C(t - 100) t^3]$$

peut être mise sous la forme équivalente

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} 100 + \delta \left( \frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} + \beta \left( \frac{t}{100} - 1 \right) \left( \frac{t}{100} \right)^3.$$

7. *Le thermocouple étalon.* — Il est recommandé d'utiliser un thermocouple étalon fait d'un fil dont le diamètre ne soit pas plus petit que 0<sup>mm</sup>,35 ni plus gros que 0<sup>mm</sup>,65.

Le mode opératoire à observer pour utiliser le point de solidification de l'antimoine comme température d'étalonnage est essentiellement le même que celui qui a été spécifié pour l'argent. L'antimoine a une tendance marquée à rester en surfusion avant de se solidifier. La surfusion ne sera pas excessive si l'on ne chauffe le métal que quelques degrés au-dessus de son point de fusion et si l'on agite le métal liquide. Pendant la solidification, la température doit rester constante dans les limites de 0,1 degré pendant une durée d'au moins 5 minutes.

8. *Températures au-dessus du point de solidification de l'or.* — Pour la détermination des températures au moyen d'un pyromètre optique, la formule approximative suivante

$$\log_e \frac{J_t}{J_{1063,0}} = \frac{1.436}{\lambda} \left[ \frac{1}{1336} - \frac{1}{(t_a + 273)} \right]$$

fournira généralement des valeurs qui ne sont pas sensiblement différentes de celles que fournit la formule donnée dans la deuxième Partie. Dans le Tableau 2, les valeurs de  $t_a$  obtenues en utilisant cette formule d'approximation, ainsi que les valeurs de  $t_b$  obtenues en utilisant la formule donnée dans le texte de l'Échelle Internationale de Température de 1927 sont comparées à  $t$ , température exprimée dans l'Échelle Internationale de Température de 1939. La relation entre  $t_a$  et  $t_b$  est indépendante de la valeur  $\lambda$  utilisée; mais les relations entre  $t$  et  $t_a$  et entre  $t$  et  $t_b$  données dans le Tableau 2 sont relatives à  $\lambda = 65 \cdot 10^{-6}$  cm. Pour des valeurs plus petites de  $\lambda$ , les valeurs de  $t_a$  seront plus petites. Ainsi pour  $\lambda = 45 \cdot 10^{-6}$  cm, une valeur de  $t_a = 10143^\circ$  correspond à une température de  $t = 10000^\circ$  C (Int. 1939).

Les nombres entre parenthèses correspondent aux températures qui sortent des limites du domaine de l'Échelle Internationale de Température de 1927.

TABLEAU 2.

Valeurs correspondantes de la température, calculées à partir des trois formules, pour  $\lambda = 65 \cdot 10^{-6}$  cm.

$t^{\circ}\text{C.}$	$t_a$ .	$t_b$ .
1063,0.....	1063,0	1063,0
1500,0.....	1499,9	1501,5
2000,0.....	1999,7	2004,2
2500,0.....	2499,6	2507,9
3000,0.....	2999,8	3013,1
3500,0.....	3500,7	3520,1
4000,0.....	4003,2	4029,7
4500,0.....	4508,3	4543
5000.....	5017	(5061)
6000.....	6050	(6117)
8000.....	8222	(8351)
10000.....	10617	(10839)
20000.....	32130	(34370)
31600.....	$\infty$	(-478560)
$\infty$ .....	-273	(-273)

9. *Relation entre l'Échelle Kelvin et l'Échelle Internationale de Température.* — La différence entre une température exprimée dans l'Échelle Kelvin et la même température exprimée dans l'Échelle Thermodynamique Centigrade est la valeur numérique de  $T_0$ , point de fusion de la glace dans l'Échelle Kelvin. Comme les températures exprimées dans l'Échelle Internationale de Température sont très approximativement les mêmes que les températures exprimées dans l'Échelle Thermodynamique Centigrade, il est recommandé, lorsque des températures de l'Échelle Internationale de Température doivent être exprimées dans l'Échelle Kelvin, que l'on fasse usage de la relation  $T = t + T_0$ , et que, en vue d'assurer l'uniformité,  $T_0$  soit pris égal à  $273^{\circ},16$ .

10. *Points secondaires.* — En plus des points fixes fondamentaux, on peut disposer d'un certain nombre d'autres points fixes, qui peuvent être utilisés dans l'étalonnage d'instruments secondaires de mesure de la température. Quelques-uns de ces points, ainsi que leur température dans l'Échelle Internationale, sont groupés dans le Tableau 3. Les températures données sont

celles qui correspondent à une pression de 760<sup>mm</sup> de mercure. Les formules donnant la variation de la pression de vapeur avec la température sont destinées à être utilisées dans tout le domaine qui s'étend de  $p = 680^{\text{mm}}$  à  $p = 780^{\text{mm}}$ .

TABLEAU 3.

*Points fixes secondaires à 760<sup>mm</sup> de pression.*

	°C. (Int. 1939).
Température d'équilibre entre l'anhydride carbonique solide et sa vapeur.....	— 78,51
$t_p = t_{760} + 15,95 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 11 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2$ .	
Température de solidification du mercure.....	— 38,86
Température de transition du sulfate de sodium décahydraté.....	32,38
Température de la vapeur de naphthalène saturante.....	217,96
$t_p = t_{760} + 58,4 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 33 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2$ .	
Température de solidification de l'étain.....	231,85
Température de la vapeur de benzophénone saturante.....	305,9
$t_p = t_{760} + 64,2 \left( \frac{p - 760}{1000} \right) - 37 \left( \frac{p - 760}{1000} \right)^2$ .	
Température de solidification du cadmium.....	320,9
Température de solidification du plomb.....	327,3
Température de solidification du zinc.....	419,5
Température de solidification de l'antimoine.....	630,5
Température de solidification du cuivre en atmosphère réductrice.....	1083,1
Température de solidification du nickel.....	1453,5
Température de solidification du palladium.....	1552
Température de solidification du platine.....	1770
Température de solidification de l'iridium.....	2446
Température de fusion du tungstène.....	3390



ANNEXE T 3.

National Bureau of Standards.

---

DONNÉES DÉTAILLÉES

CONCERNANT

L'ÉCHELLE DE TEMPÉRATURE

DANS LE DOMAINE DÉFINI

AU MOYEN DU COUPLE THERMOÉLECTRIQUE.

(Mars 1939).

---

En comparant les indications de thermocouples étalons et de thermomètres à résistance étalons au voisinage de  $660^{\circ}\text{C}$ , on a obtenu les résultats qui sont donnés dans le Tableau I. Celui-ci montre que dans l'Échelle Internationale de Température de 1927, la température indiquée comme étant  $660^{\circ}$  par le thermocouple est plus élevée que la température indiquée comme étant  $660^{\circ}$  par le thermomètre à résistance d'une quantité qui est d'environ  $0,15$  degré de l'Échelle Centigrade Thermodynamique. Le point de fusion de l'aluminium pur est compris entre ces deux températures et se trouve par conséquent dans l'intervalle que l'on ne peut exprimer dans l'échelle de 1927. On propose de supprimer cette anomalie en définissant l'échelle au moyen du thermomètre à résistance depuis  $-190^{\circ}\text{C}$  jusqu'au point de solidification de l'antimoine au lieu de la définir de  $-190^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $660^{\circ}\text{C}$ .

Comme il est indiqué dans le *Mémoire sur le projet de rédaction* (Annexe T 2, p. T 61), il serait également avantageux de modifier la formule d'interpolation utilisée avec le thermocouple, afin que les écarts entre l'Échelle Internationale et

l'Échelle Kelvin aient une allure aussi continue que possible au voisinage des points de partage de l'échelle au point de solidification de l'antimoine et au point de solidification de l'or.

TABLEAU I.  
*Observations au point de solidification de l'aluminium.*

Année.	Observateurs.	Thermomètre à résistance E. I. T. 1927 (° C.)	N°.	Couple thermoélectrique		1939 Éq. 9 proposée Tab. VI (° C.)
				E. I. T. 1927 Éq. 1 Tab. III (° C.)		
1929.	Roeser <sup>(1)</sup> .....	659,23	E 2 et E 3	659,05 <sup>(2)</sup>		659,18 <sup>(2)</sup>
1936.	Dahl et Jessup <sup>(3)</sup> ....	660,01	I 8	659,87		660,02
1939.	"	660,07	SC 3	659,91		660,05
1939.	"	660,07	SC 4	659,93		660,07

Tant que l'on n'aura pas introduit un changement dans la formule utilisée pour l'interpolation dans le domaine du thermocouple, les résultats dont on dispose et qui sont résumés dans le Tableau VI indiqueront que, dans l'échelle de température qui en résulte, la pente de la courbe représentant une propriété quelconque d'une substance comme une fonction de la température possédera une discontinuité d'environ 5 pour 1000 au point de l'antimoine et une discontinuité de 2 pour 1000 au point de l'or.

La valeur de  $\frac{de}{dt}$  du thermocouple à 1063°C dépend presque exclusivement de la valeur assignée à l'intervalle de température qui sépare les points de solidification de l'or et de l'argent. En conséquence, la valeur assignée à cet intervalle doit s'accorder avec celle que l'on détermine au pyromètre optique, si des intervalles de température mesurés au voisinage de 1063° avec les deux instruments doivent être les mêmes. La valeur pour le point de solidification de l'argent qui donnera ce résultat dépend évidemment de la valeur de  $C_2$  utilisée pour la définition de l'échelle au-dessus du point de solidification de l'or.

(<sup>1</sup>) *Bur. of Stds. Journ. Research*, 3, 1929, p. 343, R. P. 99.

(<sup>2</sup>) La valeur rapportée dans le N. B. S., R. P. 99 a été recalculée en tenant compte du changement du point de solidification de l'argent rapporté dans le N. B. S., R. P. 557 et R. P. 573.

(<sup>3</sup>) Non publié.

Quelques déterminations de l'intervalle de température qui sépare les points de solidification de l'argent et de l'or sont données dans le Tableau II. Les deux déterminations de cet intervalle au moyen d'un thermomètre à gaz qui sont citées tombent entre les deux valeurs obtenues au moyen d'un pyromètre optique et calculées en prenant  $C_2 = 1,432$  ou  $C_2 = 1,436$ . Pour cet intervalle la valeur obtenue au moyen du thermomètre à résistance tombe de même entre ces deux dernières valeurs, mais n'a peut-être pas grande signification. Elle se trouve quelque peu plus près de la valeur obtenue en prenant  $C_2 = 1,436$ . Les valeurs 960,5 pour le point de solidification de l'argent et 1,432 pour  $C_2$  sont cohérentes dans la limite des erreurs d'observation et les valeurs 960,7 pour le point de solidification de l'argent et 1,436 pour  $C_2$  sont pareillement cohérentes, aux erreurs d'observation près. De plus, l'une ou l'autre des valeurs du point de solidification de l'argent est d'accord avec les déterminations de l'intervalle au moyen d'un thermomètre à gaz à 0,1 ou 0,2 degré

TABLEAU II.

*Observations donnant la différence de température entre les points de solidification de l'or et de l'argent.*

Année.	Observateurs.	Instruments.	Différence en degrés.
1899.	Holborn et Day <sup>(1)</sup> ...	Thermomètre à gaz	102,5
1911.	Day et Sosman <sup>(2)</sup> ...	»	102,4
1936.	Wensel et Roeser <sup>(3)</sup> .	Pyromètre optique	{ $(C_2 = 1,432)$ $(C_2 = 1,436)$
1930.	Moser <sup>(4)</sup> .....	Thermomètre à résistance	102,37 <sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> *Wied. Ann.*, 63, 1899, p. 817; *Am. J. Sci.*, 8, 1899, p. 165.

<sup>(2)</sup> *Car. Inst. of Wash. Pub.*, n° 157, 1911; *Am. J. Sci.*, 33, 1912, p. 517.

<sup>(3)</sup> Non publié.

<sup>(4)</sup> *Ann. d. Physik*, 3, 1930, p. 852.

<sup>(5)</sup> Cette différence a été obtenue en employant le point de solidification de l'or (1063°,00 C) comme quatrième point d'étalonnage et en modifiant l'équation de Callendar aux températures plus élevées. La valeur rapportée a été recalculée en tenant compte du changement du point de solidification de l'argent mentionné dans N. B. S., R. P. 573; *Ann. d. Physik*, 2, 1933, p. 243; *N. P. L. Collected Researches*, 24, 1932-33, p. 115; et vérifiée par correspondance.

près. Une comparaison de diverses formules d'interpolation est donnée dans les Tableaux III et IV pour un certain thermocouple. Celles du Tableau III sont fondées sur 960,5 pour le point de solidification de l'argent, tandis que celles du Tableau IV sont fondées sur 960,7 pour ce même point. On voit que, si l'on choisit 960,7 pour le point de solidification de l'argent, l'équation (9)  $e = at + bt^2 + ct^3 - 200$  évite au mieux les discontinuités mentionnées. Si le point de solidification est maintenu à 960,5, dans ce cas l'équation (4)  $e = at + bt^2 + ct^3 - 100$  réalise au mieux le même résultat. On a obtenu des résultats pratiquement identiques avec trois thermocouples différents provenant de deux origines différentes.

On peut voir l'effet d'un changement de 0,2 degré du point de solidification de l'argent et l'effet d'un changement du terme constant dans la formule d'interpolation en comparant les différentes colonnes des Tableaux III et IV. Le terme constant, calculé lorsque le point de solidification du zinc est utilisé comme quatrième point d'étalonnage, est environ  $-230$  lorsque le point de solidification de l'argent est pris égal à 960°,5C (équation 2), et est environ  $-270$  lorsque le point de solidification de l'argent est pris égal à 960°,7 (équation 8).

On ne possède aucun résultat qui indique que l'une des équations discutées représente l'Échelle Centigrade Thermodynamique plus fidèlement qu'aucune des autres. Day et Sosman, en comparant des thermocouples au thermomètre à gaz à un certain nombre de points fixes situés entre 320°C et 1083°C et aussi à 854°C, ont trouvé que des équations de la forme  $e = a + bt + ct^2$  et de la forme  $e = a + bt + ct^2 + dt^3$  représentent les observations avec l'exactitude qu'ils mentionnent pour leurs comparaisons, exactitude qui varie depuis 0,3 degré à 320°C jusqu'à 0,8 degré à 1083°C.

Quelques observations de l'intervalle de température compris entre le point de solidification de l'or et le point de solidification du cuivre sont montrées dans le Tableau V. L'intervalle est soit 20,1, soit 20,2 degrés C. Si l'on choisit pour  $C_2$  la valeur 1,436, le point de solidification du cuivre devrait être 1083,1 tandis que si  $C_2$  est pris égal à 1,432, le point de solidification du cuivre devrait être 1083,2. Le Tableau VI indique que 1083,2 pour le cuivre et 960,5 pour l'argent, ou bien 1083,1 pour le cuivre et 960,7 pour l'argent, sont des valeurs respectivement cohérentes.

TABLEAU III. — Comparaison de diverses équations d'interpolation, le point de solidification de l'argent étant fixé à 960°,5 C.

	Temp. donnée		Thermocouple f. e. m. Microvolts.	Température donnée par l'équation n°					
	par therm. résistance.	par pyrom. optique $C_4=1,432$ .		(1).	(2).	(3).	(4).	(5).	(6).
				E. I. T. 1927					
Sb.....	630,43		5230,0	600,00	599,89	599,87	599,79	599,76	599,76
Al.....	660,07		5544,0	630,43	630,43	630,43	630,43	630,43	630,43
			5851,1	659,93	660,00	660,02	660,07	660,12	660,10
			6272,6	700,00	700,12	700,16	700,26	700,34	700,29
Cu—Ag.....			7113,6	778,55	778,70	778,74	778,85	778,96	778,89
			7346,5	800,00	800,14	800,17	800,28	800,38	800,31
			8451,6	900,00	900,04	900,06	900,10	900,13	900,11
Ag.....		960,4	9135,4	960,50	960,50	960,50	960,50	960,50	960,50
			9588,0	1000,00	999,98	999,98	999,97	999,96	999,97
Au.....		1063,00	10319,9	1063,00	1063,00	1063,00	1063,00	1063,00	1063,00
		1083,18	10556,6	1083,15	1083,17	1083,17	1083,19	1083,20	1083,19
			10755,5	1100,00	1100,04	1100,05	1100,08	1100,12	1100,09

- Équation (1) :  $e = a + bt + ct^2$  (Point de Sb, Ag, + Au) (Éch. Int. Temp. 1927),  
 » (2) :  $e = a + bt + ct^2 + dt^3$  ( » Zn, Sb, Ag, + Au),  
 » (3) :  $e = at + bt^2 + ct^3 - 200$  ( » Sb, Ag, + Au),  
 » (4) :  $e = at + bt^2 + ct^3 - 100$  ( » Sb, Ag, + Au),  
 » (5) :  $e = at + bt^2 + ct^3$  ( » Sb, Ag, + Au),  
 » (6) :  $e = at - be^{-ct}$  ( » Sb, Ag, + Au).

TABLEAU IV. — Comparaison de diverses équations  
d'interpolation, le point de solidification de l'argent étant fixé à 960°,7 C.

	Temp. donnée		Thermocouple f. c. m. Microvolts.	Température donnée par l'équation n°					
	par therm. résistance. E. I. T. 1927	par pyrom. optique C <sub>2</sub> = 1,4356.		(7).	(8).	(9). Propos. NBS 1939	(10).	(11).	(12).
Sb.....	630,43		5230,0 5544,0	599,90 630,43	599,86 630,43	599,81 630,43	599,74 630,43	599,66 630,43	599,69 630,43
Al.....	660,07		5851,1 6272,6	660,00 700,15	660,03 700,21	660,07 700,27	660,13 700,37	660,18 700,47	660,16 700,43
Cu—Ag.....			7113,6 7346,5	778,72 800,28	778,88 800,33	778,95 800,40	779,06 800,50	779,17 800,61	779,12 800,55
Ag.....		960,7	8451,6 9135,4 9588,0	900,26 960,70 1000,14	900,28 960,70 1000,13	900,30 960,70 1000,12	900,34 960,70 1000,11	900,38 960,70 1000,10	900,36 960,70 1000,10
Au.....		1063,00	10319,9	1063,00	1063,00	1063,00	1063,00	1063,00	1063,00
Cu.....		1083,12	10556,6 10755,5	1083,10 1099,90	1083,10 1099,92	1083,12 1099,94	1083,13 1099,97	1083,14 1100,00	1083,14 1099,98
Équation	(7)		$e = a + bt + ct^2$	(Point de Sb, Ag, + Au),					
»	(8)		$e = a + bt + ct^2 + dt^3$	( » Zn, Sb, Ag, + Au),					
»	(9)		$e = at + bt^2 + ct^3 - 200$	( » Sb, Ag, + Au) (Propos. N.B.S 1939),					
»	(10)		$e = at + bt^2 + ct^3 - 100$	( » Sb, Ag, + Au),					
»	(11)		$e = at + bt^2 + ct^3$	( » Sb, Ag, + Au),					
»	(12)		$e = at - be^{-ct}$	( » Sb, Ag, + Au).					

TABLEAU V.

*Observations donnant la différence  
entre les points de solidification du cuivre et de l'or.*

Année.	Observateurs.	Instruments.	Différence en degrés.
1899.	Holborn et Day (1) . . . . .	Thermomètre à gaz	20,1
1911.	Day et Sosman (2) . . . . .	»	20,2
1936.	Wensel et Roeser (3) . . . . .	Pyromètre optique { (C <sub>2</sub> = 1,432) (C <sub>2</sub> = 1,436)	20,18 20,12

(1) Voir référence (1), Tableau II.

(2) Voir référence (2), Tableau II.

(3) Non publié.

Si la limite supérieure de la partie de l'échelle qui est fondée sur le thermomètre à résistance est portée de 660° au point de solidification de l'antimoine, il n'y aura aucun changement apparent dans l'échelle elle-même, et l'anomalie à 660° sera écartée. Nous nous attendons à ce que ce changement soit accepté d'une façon générale.

TABLEAU VI.

*Comparaison entre  
l'Échelle Internationale de Température de 1927 et l'échelle proposée.*

Thermomètre à résistance		Thermocouple			Pyromètre optique	
E. I. T. 1927.	Proposition 1939.	E. I. T. 1927 Éq. (1).	Proposition 1939 Éq. (4).	Proposition 1939 Éq. (9).	E. I. T. 1927 C <sub>2</sub> = 1,432.	Proposition 1939 C <sub>2</sub> = 1,436.
630,50	630,50	630,50	630,50	630,50		
660,00	(660,00)	(659,86)	660,00	660,00		
(660,14)	(660,14)	660,00	660,14	660,14		
		700,00	700,26	700,27		
		800,00	800,28	800,40		
		900,00	900,10	900,30		
		960,50	960,50	960,70	(960,4)	(960,7)
		1000,00	999,97	1000,12		
		1063,00	1063,00	1063,00	1063,00	1063,00
		(1083,15)	(1083,19)	(1083,12)	(1083,18)	1083,12

Les arguments en faveur d'une modification consistant à choisir C<sub>2</sub> = 1.436 au lieu de C<sub>2</sub> = 1.432 paraissent être suffi-

sants pour appeler un examen très sérieux. Les avantages qu'il y a à utiliser ce qui semble être une meilleure valeur pour  $C_2$  doivent être mis en balance en face des inconvénients temporaires qui résultent d'un changement.

La disposition de la partie de l'échelle fondée sur le thermocouple dépend étroitement de la décision concernant la valeur de  $C_2$ . Il semble que trois solutions soient à envisager.

1<sup>o</sup> Pas de changement autre que de reporter au point de solidification de l'antimoine la limite inférieure de la partie de l'échelle définie au moyen du thermocouple. Ceci n'impliquera pratiquement aucun des inconvénients dont est nécessairement accompagné tout changement.

2<sup>o</sup> Faire le changement mentionné ci-dessus au 1<sup>o</sup>, conserver la même valeur de  $C_2$ , mais donner à l'équation du thermocouple la forme nouvelle  $e = at + bt^2 + ct^3 - 100$ . Ceci n'impliquera aucun changement des températures assignées à aucun des points fixes de base, et n'introduira aucun changement en dehors de l'intervalle compris entre 630°C et 1063°C. Il n'y aura aucune variation brusque de la valeur de  $\frac{de}{dt}$  pour un couple thermoélectrique, par exemple à 630° ou à 1063°. Le changement de l'équation du couple thermoélectrique serait considéré probablement comme une simple modification de forme, et le changement d'échelle qui atteint presque 0,3 degré à 800°C ne serait sans doute qu'un petit inconvénient.

3<sup>o</sup> Faire la modification mentionnée au 1<sup>o</sup>, porter la valeur de  $C_2$  à 1,436, porter à 960,7 la température assignée au point de solidification de l'argent et donner à l'équation du thermocouple la forme nouvelle  $e = at + bt^2 + ct^3 - 200$ . Tous les changements indiqués au 3<sup>o</sup> sont inclus dans le projet de rédaction de février 1939, soumis par notre Bureau. Ce projet de rédaction définit une échelle qui, dans toute son étendue, est la meilleure représentation de l'Échelle Thermodynamique Centigrade à laquelle nous ayons pu parvenir. Nous proposons l'adoption de cette échelle, parce que nous croyons que les avantages des changements surpasseront les inconvénients qui les accompagnent.

Une comparaison de l'Échelle Internationale de Température de 1927 avec l'échelle proposée dans le *Projet de rédaction* est donnée dans le Tableau VI pour le domaine compris entre 630,5°C et 1083°C.

ANNEXE T 4.

National Bureau of Standards.

---

L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DES TEMPÉRATURES

ET

QUELQUES CONSTANTES PHYSIQUES S'Y RAPPORTANT

Par M. H.-T. WENSEL.

(Mémoire paru dans *Jour. of Research of the Nat. Bur. of Stand.*,  
22, 1939, p. 375. Résumé ci-dessous.)

---

L'auteur passe d'abord en revue nos connaissances concernant les constantes de radiation, dans le but de choisir, pour la constante  $C_2$  de l'équation de Planck, une valeur permettant l'établissement au-dessus de 1063° C d'une échelle de température concordant d'une façon plus étroite avec l'Échelle Thermodynamique. Les valeurs figurant dans les publications sont discutées, et l'auteur présente quelques indications pour calculer  $C_2$ , à partir des résultats obtenus avec le thermomètre à gaz. Les constantes auxquelles on arrive sont les suivantes :

$$\sigma = (5,70 \pm 0,02) 10^{-5} \text{ erg sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-4},$$

$$C_1 = (3,732 \pm 0,006) 10^{-5} \text{ erg cm}^2 \text{ sec}^{-1},$$

$$C_2 = (1,436 \pm 0,001) \text{ cm.deg},$$

$$\lambda_m T = (2892 \pm 2) 10^{-4} \text{ cm.deg}.$$

---

ANNEXE T 5.  
National Physical Laboratory.

---

COMMENTAIRES  
SUR LE PROJET  
D'UNE  
ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE  
DE 1939,  
PRÉSENTÉ PAR LE NATIONAL BUREAU OF STANDARDS  
(25 mai 1939).

---

De même que le National Bureau of Standards, le National Physical Laboratory a trouvé que l'Échelle Internationale de Température de 1927, d'une façon générale, donne satisfaction comme échelle d'usage. La plupart des changements numériques que l'on propose maintenant ont un effet si petit que leur importance pratique est très faible pour l'époque actuelle. Considérant ce fait, et la perturbation que provoqueraient inévitablement des changements apportés à l'échelle, le National Physical Laboratory insiste pour que les modifications que l'on pourrait éventuellement décider soient limitées à celles qui sont suffisamment bien fondées pour n'avoir aucune chance d'être révisées ultérieurement.

*Disposition générale du projet.* — Le National Physical Laboratory est d'accord avec la disposition générale de la nouvelle rédaction proposée par le National Bureau of Standards.

*Partie de l'Échelle au-dessus du point de fusion de l'or.* — Le National Physical Laboratory est d'accord pour substituer

la loi de Planck à la loi de Wien, et considère que l'on a raison de regarder la valeur présente de  $C_2$  comme trop faible. Les arguments en faveur du changement sont principalement fondés sur des constantes atomiques, et le National Physical Laboratory ajoute en annexe (p. T 93) quelques remarques sur la façon dont ce sujet est traité dans la publication de M. Wensel. On verra que l'opinion exprimée est que les limites d'incertitude, attribuées à la valeur de  $C_2$  déduite de constantes atomiques, devraient être élargies et portées à environ  $\pm 0,003$ . Même si l'on tient compte des résultats obtenus par l'étude du rayonnement, le National Physical Laboratory considère néanmoins que l'incertitude atteindrait une fraction si forte du changement proposé, qu'il conseillerait d'ajourner la question de la révision.

*Partie de l'Échelle couverte par le couple thermoélectrique au platine.* — Le National Physical Laboratory donne son approbation à la proposition de changer la limite inférieure de cette partie de l'échelle en la portant de  $660^\circ\text{C}$  au point de solidification de l'antimoine.

En ce qui concerne les autres modifications de l'échelle, les différences entre les trois variantes suggérées par le National Bureau of Standards sont si légères, que le National Physical Laboratory considère que l'importance de la perturbation provoquée devrait être un facteur puissant pour influencer le choix. Ainsi, le National Physical Laboratory aurait tendance à préférer la première ou la deuxième solution.

On peut ajouter que le National Physical Laboratory a entrepris une détermination de la différence de température qui sépare les points de solidification de l'argent et de l'or, au moyen d'un thermomètre à résistance, et espère terminer ses expériences avant la session du Comité consultatif de Thermométrie.

En ce qui concerne l'effet que les diverses alternatives pour définir les températures supérieures et inférieures au point de solidification de l'or peuvent avoir sur la continuité de l'échelle, il semblerait qu'une incertitude de  $\pm 0,1$  degré dans la mesure du rayonnement à chaque température recouvrirait probablement tout désaccord depuis le point de solidification de l'argent jusqu'à celui du cuivre. Le National Physical Laboratory considère que ce chiffre est la limite extrême que l'on puisse atteindre dans des mesures de rayonnement à l'époque actuelle.

*Partie de l'Échelle couverte par le thermomètre à résistance de platine.* — Le National Physical Laboratory est favorable à la proposition de définir la pureté du platine par la valeur du rapport

$$\frac{R_{333,60} - R_0}{R_{100} - R_0}$$

plutôt que par celle du rapport  $\frac{R_{333,60}}{R_0}$ . On ne voit pourtant pas clairement pourquoi il a été jugé nécessaire de donner une limite supérieure à la valeur de cette fonction, aucune limite supérieure du rapport  $\frac{R_{333,60}}{R_0}$  n'ayant été spécifiée par le passé.

Ces remarques s'appliquent également aux modifications proposées dans les spécifications concernant la résistance au point d'ébullition de l'oxygène.

On a observé que l'utilisation de thermomètres à résistance du type comportant un conducteur de courant et une prise de potentiel a été évidemment rendue obligatoire par la référence à ce seul type d'instrument à la page T 69. Tout en étant d'accord que c'est là une technique expérimentale excellente, le National Physical Laboratory est d'avis qu'il vaudrait mieux formuler la définition de l'échelle par les propriétés du métal, sans se référer à la manière dont il est monté ou connecté au circuit de mesure, et que de telles remarques seraient placées d'une façon plus convenable dans le paragraphe 6 des « Modes opératoires recommandés ».

Le National Physical Laboratory donne son appui à la suggestion tendant à inclure la formule donnant la correction de pression pour le point de fusion de la glace.

Il est suggéré que des renseignements complémentaires pourraient être avantageusement fournis au sujet du type spécial d'hypsomètre auquel il est fait allusion dans le paragraphe 3 des « Modes opératoires recommandés ». Il semblerait désirable, pour les membres du Comité de Thermométrie, de se ménager l'occasion de considérer les résultats obtenus avec cet appareil, en les comparant à ceux que donne la forme usuelle d'appareil, avant de recommander ce procédé pour reproduire le point d'ébullition de l'eau.

*Points fixes secondaires.* — Le National Physical Laboratory prend note de la remarque d'après laquelle, quelques-unes des valeurs de l'échelle de 1927 ayant été arrondies, la différence

entre ces valeurs et celles qui sont proposées ne correspond pas exactement à la différence entre les deux échelles. Cela s'applique, semble-t-il, au point de fusion du palladium et du tungstène. Dans l'hypothèse où le changement proposé pour la valeur de  $C_2$  serait adopté, il serait utile pour le Comité de Thermométrie que le Bureau of Standards expliquât comment il est arrivé aux valeurs choisies.

Il est observé que le point de solidification de l'iridium est mentionné d'après une nouvelle détermination récente faite au Bureau of Standards, mais que le point de solidification du rhodium, obtenu par une méthode analogue, n'est pas mentionné. Le National Physical Laboratory a terminé récemment un travail de recherches sur ce dernier point, et il a obtenu une valeur qui confirme étroitement celle du Bureau of Standards. On espère qu'un compte rendu de ce travail pourra être soumis à l'examen du Comité de Thermométrie.

ANNEXE T 6.

National Physical Laboratory.

---

REMARQUES

SUR LE MÉMOIRE DE H.-T. WENSEL

« L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE

ET

QUELQUES CONSTANTES PHYSIQUES S'Y RAPPORTANT » (1)

(25 mai 1939).

---

*Détermination de la valeur de  $C_2$  d'après des constantes atomiques.* — L'exactitude de la détermination de  $C_2$  dépend en grande partie de l'exactitude avec laquelle le rapport  $\frac{h}{e}$  peut être déterminé. Ainsi qu'il est indiqué dans le Mémoire en question, il y a plusieurs façons de mesurer expérimentalement ce rapport. Certaines méthodes donnent  $\frac{h}{e}$  directement, tandis que d'autres donnent  $\frac{h}{e}$  en fonction d'autres constantes telles que  $e$  et  $\frac{e}{m}$ . Celles qui donnent  $\frac{h}{e}$  directement (potentiels d'ionisation et effet photoélectrique) sont probablement les plus difficiles au point de vue expérimental, et il paraît bien que ces difficultés font plus que contre-balancer l'avantage d'une détermination directe.

---

(1) *J. of Research of the Nat. Bur. of Stand.*, 1939, 22, p. 375.

Les autres méthodes donnent des valeurs de  $\frac{nh}{e}$  avec une valeur de  $n$  différente de l'unité. Les valeurs de  $\frac{h}{e}$  déduites de ces méthodes dépendent donc de la valeur de  $e$  et, dans certains cas, de la valeur de  $\frac{e}{m}$ . En conséquence l'exactitude de la détermination de  $C_2$  par cette dernière méthode dépend de l'exactitude avec laquelle sont effectuées les expériences, et aussi de l'exactitude avec laquelle les valeurs de  $e$  et de  $\frac{e}{m}$  sont connues. En déterminant la valeur de  $C_2$ , il faut par conséquent considérer non seulement les expériences particulières impliquées, mais aussi les déterminations expérimentales de  $e$  et dans certains cas de  $\frac{e}{m}$ .

Jusqu'à une date assez récente, la valeur admise de  $e$  en unités électrostatiques était  $(4,770 \pm 0,004)10^{-10}$ . Une comparaison des longueurs d'onde des rayons X, déterminées par diffraction sur un cristal, puis au moyen d'un réseau, laissait supposer que cette valeur de  $e$  était trop faible et qu'une valeur plus correcte serait  $4,800 \cdot 10^{-10}$ , valeur qui est nettement en dehors des limites d'erreurs admises dans la détermination par la méthode des gouttelettes d'huile. On a considéré tout d'abord que le désaccord était dû à des erreurs expérimentales dans les déterminations au moyen du réseau. Des mesures plus exactes n'ont pas écarté le désaccord, mais l'ont confirmé. L'opinion actuelle, généralement admise, est que la valeur de  $e$ , obtenue par la méthode des gouttes d'huile, est entachée d'une erreur sérieuse par suite de l'utilisation d'une valeur erronée pour la viscosité de l'air. Des déterminations plus récentes de cette constante ont concilié les valeurs de  $e$  déterminées par les deux méthodes. Le résultat moderne est  $(4,800 \pm 0,005)10^{-10}$  unités électrostatiques, et la valeur vraie de  $e$  se trouve probablement à l'intérieur de ces limites.

Un désaccord quelque peu analogue s'est produit dans les mesures de  $\frac{e}{m}$ . Ici encore, il y a deux méthodes principales, l'une fondée sur l'étude des électrons libres, l'autre sur des mesures spectroscopiques. La différence entre les valeurs obtenues par ces deux méthodes a donné naissance à l'opinion qu'elle était due au fait que, dans l'un des cas, on avait affaire à des électrons

libres, tandis que dans l'autre on considèrait des électrons dans le champ atomique. Des déterminations récentes ont cependant concilié les valeurs obtenues de part et d'autre, et  $\frac{e}{m}$  est probablement la combinaison de constantes atomiques dont la valeur est la mieux connue. On admet généralement la valeur  $\frac{e}{m} = (1,7585 \pm 0,001) 10^7$  unités électromagnétiques.

L'histoire de l'une et de l'autre de ces constantes montre combien il est difficile d'accepter les limites d'erreur données par les expérimentateurs eux-mêmes. La valeur de la constante de Planck  $h$  est probablement la moins bien connue de toutes les constantes atomiques. On ne la détermine jamais directement, mais toujours associée à d'autres constantes telle que  $e$ . Par suite du changement d'opinion concernant la valeur vraie de  $e$ , il y a eu un changement correspondant de la valeur admise pour  $h$ . La valeur admise est passée de  $6,56 \cdot 10^{-27}$  à  $6,61 \cdot 10^{-27}$  erg. sec.

Il est clair par conséquent qu'il y a eu, au cours de ces dernières années, des changements très nets dans les valeurs admises pour les constantes atomiques, et la Note en question exprime l'opinion que, en conséquence, la valeur de  $C_2$  demande à être modifiée. L'auteur considère les valeurs de  $C_2$  déduites de diverses déterminations de  $\frac{nh}{e}$ , de  $e$  et de  $\frac{e}{m}$ , et conclut que sa valeur vraie est  $C_2 = 1,436 \pm 0,001$ , au lieu de la valeur 1,432 utilisée dans l'Échelle internationale de température. Il semble difficile de justifier la sous-estimation faite par l'auteur au sujet de l'erreur probable de cette détermination. Les seules déterminations directes de  $\frac{h}{e}$  (potentiels d'ionisation et effet photoélectrique), après correction par l'auteur, donnent les valeurs 1,4344 et 1,4336, dont aucune ne se place à l'intérieur des limites proposées. Toutes les autres déterminations impliquent les erreurs d'autres constantes, telles que  $e$  et  $\frac{e}{m}$ , qui viennent s'ajouter aux erreurs expérimentales.

L'auteur donne une liste de diverses constantes (*loc. cit.* p. 392) dont les valeurs sont fondées sur l'ensemble des résultats connus. Dans cette liste, les valeurs données de  $e$  et de  $h$  sont les suivantes :

$$e = (4,800 \pm 0,004) 10^{-10} \text{ U. E. S.}$$

$$h = (6,61 \pm 0,01) 10^{-27} \text{ erg. sec}$$

Un calcul direct à partir de ces valeurs donnerait

$$C_2 = 1,436 \pm 0,0035 \text{ cm.deg}$$

si l'on ne tient pas compte de l'erreur dont est affecté le facteur  $k$  dans l'équation  $C_2 = k \frac{h}{e}$ . Il est pourtant probable que  $\frac{h}{e}$  est connu avec un degré d'exactitude meilleur. Des calculs détaillés appliqués aux différentes méthodes donnent bien des domaines d'incertitude plus petits; mais ils sont nettement plus grands que celui que donne l'auteur dans son résultat final. Ainsi, pour les déterminations à partir de la constante de Rydberg, dans laquelle  $\frac{h}{e}$  est obtenu en fonction de  $e$  et de  $\frac{e}{m}$ , nous obtenons la valeur finale

$$C_2 = 1,438 \pm 0,003.$$

Un calcul analogue appliqué aux méthodes faisant intervenir les rayons X, par lesquelles on détermine  $\frac{h}{e^{1/2}}$ , donne

$$C_2 = 1,436 \pm 0,003$$

en tenant compte des erreurs d'observation et de l'erreur sur  $e$ .

Les méthodes de diffraction électronique paraissent donner comme valeur finale

$$C_2 = 1,436 \pm 0,004.$$

L'équation théorique d'Eddington,  $137 = \frac{hc}{2\pi e^2}$  donne pour  $C_2$  la valeur

$$C_2 = 1,4378 \pm 0,0015.$$

A cette dernière valeur l'auteur ne donne aucun poids; car il considère que la théorie sur laquelle est fondée l'équation n'est pas suffisamment établie.

Il semblerait par conséquent qu'une valeur plus raisonnable pour  $C_2$  soit  $1,436 \pm 0,003$ , en accordant une marge d'incertitude environ trois fois plus grande que celle qui est proposée par l'auteur. Étant donnée l'histoire passée des diverses constantes, il faut garder présent à l'esprit que d'autres erreurs peuvent

exister, dont on n'a pas tenu compte dans cette estimation. L'auteur lui-même rappelle que l'on a suggéré que, dans tout ou partie des déterminations expérimentales de  $\frac{e}{m}$ , ce que l'on mesure effectivement pourrait n'être pas  $\frac{e}{m}$  mais  $\frac{137}{136} \frac{e}{m}$ . Eddington admet qu'un facteur  $\frac{137}{136}$ , négligé dans la théorie quantique en usage, pourrait bien être introduit par le changement métrique, lorsqu'on assimile l'espace occupé par les particules indiscernables de la théorie quantique à l'espace occupé par les particules discernables d'un appareil de mesure. Une telle modification de la valeur de  $\frac{e}{m}$  réduirait, ainsi que le montre l'auteur, la valeur de  $C_2$  déterminée par la constante de Rydberg de 1,438 à 1,434. Elle affecterait aussi d'une façon importante la valeur obtenue par les méthodes de diffraction électronique. Ceci est mentionné afin de souligner qu'il pourrait y avoir des incertitudes sur la valeur des constantes, incertitudes qui ne sont pas incluses entre les valeurs limites telles qu'on les donne ordinairement.

L'étude des arguments présentés dans la Note de M. H.-T. Wensel et des résultats qu'il donne suggère certainement que la valeur 1,432 pour  $C_2$  est plutôt faible, que tôt ou tard un changement de cette valeur se montrera nécessaire, et que ce changement sera dans le sens d'une augmentation. Il est cependant douteux que notre connaissance actuelle des diverses constantes atomiques soit telle qu'elle permette une détermination exacte de la grandeur de la correction qu'il faudrait appliquer. Si la question n'est pas urgente — au point de vue pratique — on conseilleraient d'attendre de nouvelles déterminations, dans l'espoir d'atteindre une valeur plus précise du rapport  $\frac{h}{e}$ .

Ces remarques sont fondées simplement sur la considération des déterminations de  $C_2$  par la valeur de  $\frac{h}{e}$ , et aucun compte n'a été tenu d'autres arguments, en faveur d'une valeur plus grande, contenus dans cette Note.



ANNEXE T 7.

Physikalisch-Technische Reichsanstalt.

---

RÉPONSE

AUX

PROPOSITIONS DU NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

SUR UNE

MODIFICATION DE L'ÉCHELLE INTERNATIONALE  
DE TEMPÉRATURE.

---

La Physikalisch-Technische Reichsanstalt n'élèvera pas d'objection contre le choix du point de l'antimoine comme limite entre les domaines du thermomètre à résistance et de la pile thermoélectrique; car cette détermination a déjà été prise, dès l'année 1924, dans l'échelle des températures de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt. En 1927, nous nous étions déclarés prêts à y renoncer parce qu'on désirait définir l'échelle de température jusqu'à 660° à l'aide du thermomètre à résistance qui, dans ce domaine, offrait déjà, d'après l'état des recherches à cette époque, une plus grande exactitude que la pile thermoélectrique. Suivant notre opinion cependant, on doit approuver les considérations que vous avez jointes et la constatation, faite par vous-même, qu'il est incommode de ne pas limiter par un point fixe le domaine de validité de deux thermomètres.

La Reichsanstalt considérerait comme une amélioration essentielle pour la détermination de l'échelle de température internationale, de faire, somme toute, abstraction de la pile thermoélectrique. Déjà en 1930 on a établi, à la suite de recherches exécutées ici (Moser, *Annalen der Physik*, 6, 1930, p. 852), que le thermomètre à résistance de platine est tout à fait propre

à définir sans ambiguïté l'échelle de température dans l'intervalle entier de  $-190^{\circ}$  jusqu'au point de fusion de l'or, et à la représenter moyennant une relation unique entre la résistance et la température, relation dont les constantes peuvent être déterminées par étalonnage aux points fixes adoptés jusqu'à présent, à l'exclusion du point de l'antimoine et du point de l'argent. Le point de l'argent d'inquartation a été trouvé à  $960^{\circ},7$  après réduction des calculs, c'est-à-dire  $0,2$  degré plus élevé que la valeur internationale adoptée. Il serait extrêmement désirable que dans les autres Laboratoires nationaux on exécute également des mesures avec le thermomètre à résistance de platine jusqu'au point de fusion de l'or.

Aussi longtemps qu'on ne pourra pas faire abstraction de la pile thermoélectrique pour la fixation de l'échelle de température et qu'ainsi le point de l'argent sera nécessaire comme point fixe fondamental, il ne sera élevé aucune objection de la part de la Reichsanstalt contre la modification de la température du point de l'argent proposée par le Bureau of Standards. Cependant, nous ferions quelques réserves si, en même temps, on devait également changer la formule d'interpolation qui représente la relation entre la force électromotrice de la pile thermoélectrique et la température. Comme nous l'avons constaté par nos calculs, on obtiendrait alors vis-à-vis de l'échelle actuelle des différences de température qui, pour  $800^{\circ}$ , atteindraient presque  $0,4$  degré. Il est vrai que les mesures fondamentales de température faites jusqu'ici dans cette région ne permettent pas de déterminer avec certitude des différences de  $0,4$  degré; mais il nous semble également qu'il n'y a aucune raison péremptoire pour modifier les décisions actuellement en vigueur. Nous regretterions aussi que la formule du deuxième degré, valable jusqu'ici relativement à la température, dût être remplacée par une formule du troisième degré.

Le projet de remplacer la formule de rayonnement de Wien par celle de Planck rencontrera notre approbation.

Relativement à la constante de rayonnement  $C_2$ , la Reichsanstalt ne peut pas accepter purement et simplement de prendre à l'avenir la valeur  $1,436$  au lieu de la valeur actuelle  $C_2 = 1,432$ . Le fait que les valeurs trouvées depuis l'année 1910 en s'appuyant uniquement sur des mesures de rayonnement conduisent à la moyenne  $C_2 = 1,432$  et qu'on obtient par le calcul à partir des valeurs de  $\tau$  mesurées depuis 1921, conformément à la propo-

sition de M. Wensel, la moyenne  $C_2 = 1,433$ , ne nous fait pas paraître opportun d'abandonner la valeur de  $C_2$  acceptée jusqu'à présent de façon internationale. D'après notre conception, il n'est pas possible, en l'état actuel des expériences, d'obtenir à l'aide du thermomètre à gaz, dans la détermination de la température, des valeurs de  $C_2$  suffisamment certaines. Les meilleures mesures à l'aide du thermomètre à gaz conduisent pour le point de fusion du palladium à des valeurs trop faibles de plusieurs degrés. Mais, d'autre part, le calcul théorique de  $C_2$  à partir des constantes de l'atome conduit, d'après notre avis, à des valeurs qui malheureusement ne concordent pas suffisamment avec celles données par l'expérience.

Enfin, on ajoutera les remarques suivantes :

1<sup>o</sup> Le point de fusion de la glace ne devrait plus être défini à l'avenir par la température d'équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air, mais par le point triple de l'eau pure qui peut être défini avec beaucoup plus de précision et qui correspondrait à la température  $+ 0^{\circ},01$  ;

2<sup>o</sup> Nous préférons que la pureté du fil de platine du thermomètre à résistance ne fût pas définie par l'expression  $\frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0}$ , mais bien, comme jusqu'à présent, par  $\frac{R_t}{R_0}$ . Nous pensons que les progrès dans la fabrication du métal pur sont aujourd'hui arrivés à un point qui permet de rendre plus sévères les conditions pour la pureté du fil. Par suite, nous proposons que le rapport  $\frac{R_t}{R_0}$  soit, pour le point 100 plus grand que 1,391, pour le point du soufre plus grand que 2,647, et pour le point de l'oxygène plus petit que 0,247. Nous pouvons remarquer à ce sujet que, pour le platine le plus pur de la Reichsanstalt, ces nombres sont respectivement 1,3922, 2,6538 et 0,2446 ;

3<sup>o</sup> Nous proposons que la relation entre la température d'ébullition et la pression soit représentée, comme jusqu'ici, par une suite de termes contenant les puissances de la température, et que l'on pose la condition que la température d'ébullition de l'eau soit mesurée au voisinage de la pression normale de 760<sup>mm</sup> de mercure. Ceci peut être facilement réalisé par l'emploi d'une atmosphère artificielle, qui offre l'avantage que les variations de pression barométrique sont exclues.

ANNEXE T 8.  
Délégation française.

---

REMARQUES  
RELATIVES AU  
PROJET DE MODIFICATION  
DE LA CONVENTION PROVISoire  
SUR  
L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DES TEMPÉRATURES

Présentées par MM. G. RIBAUD et G. BOUTRY.  
(7 juin 1939).

---

I. En dehors des modifications fondamentales qui sont soulignées par le Mémorandum envoyé par le National Bureau of Standards, il faut noter dans le texte proposé la présence d'un grand nombre de modifications secondaires dont certaines valent d'être étudiées. La plupart concernent les modes opératoires recommandés pour la réalisation des points fixes.

II. Les prescriptions relatives à la réalisation du point de fusion de la glace contiennent la phrase suivante :

«...En observant quelques précautions concernant la pureté de la glace, la saturation de l'eau par l'air et l'effet de la pression, on peut réaliser une température reproductible à mieux que 0,001 degré. »

Si des mesures suffisamment complètes ont été faites à ce sujet, cette phrase demanderait à être précisée; il serait dési-

rable d'indiquer la concentration maximum tolérable des impuretés usuelles ou encore la conductibilité électrique équivalente. (Le Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers et, à notre connaissance, d'autres Institutions contrôlent la pureté de la glace, ou plutôt de l'eau de fusion de celle-ci, en mesurant au pont de Kohlrausch sa conductibilité électrique. Ces mesures permettent, par application de la loi de Raoult sur l'abaissement du point de congélation d'une solution très étendue, de calculer l'ordre de grandeur d'une correction qui n'a d'intérêt que si elle reste très petite.)

III. Dans les prescriptions relatives au point de solidification de l'argent et de l'or, on relève la description détaillée d'un mode opératoire qui n'est pas, à notre connaissance, le seul actuellement employé. Il ne paraît pas démontré qu'il soit actuellement désirable de proscrire tout autre mode opératoire dont les résultats sont concordants avec celui qui est adopté par le National Bureau of Standards.

Dans un mode opératoire utilisé par le National Physical Laboratory et, sous une forme à peine différente par le Laboratoire d'Essais, le métal est enfermé dans un creuset de silice pure fondue et étanche; l'argent et l'or y sont fondus sous le vide, l'antimoine y est fondu dans une atmosphère d'azote pur à la pression atmosphérique. Le couple à étalonner, gainé par une baguette de porcelaine de Berlin à deux trous coaxiaux, monte et descend dans un tube mince de silice fondue soudé au couvercle et plongeant dans le métal en fusion.

Ce mode opératoire donne des résultats qui semblent en accord avec ceux qu'obtient le Bureau of Standards. La reproductibilité des mesures est excellente et la pollution du métal est rendue à peu près impossible.

Sans recommander l'adoption du mode opératoire ci-dessus décrit, à l'exclusion d'un autre, il paraît très désirable de continuer à l'autoriser jusqu'à plus ample informé.

IV. Le Tableau 3 (voir p. T 79) donnant, à titre d'information, une liste des points fixes secondaires indique, pour la température d'équilibre entre l'anhydride carbonique solide et sa vapeur, à la pression atmosphérique, une température de  $-78^{\circ},51$  (Int. 1939).

Le Laboratoire d'Essais poursuit actuellement des recherches

sur une réalisation commode de cette température. La conclusion, toute provisoire, à laquelle il est parvenu jusqu'ici est que, avec les dispositifs et les modes opératoires que l'on peut trouver dans la littérature actuellement publiée, il paraît difficile de réaliser la température en question avec une incertitude inférieure à 0,01 degré; une incertitude dix fois plus forte semble plus près de la réalité, en sorte qu'il paraîtrait préférable de donner la température d'équilibre entre  $\text{CO}_2$  solide et  $\text{CO}_2$  vapeur, à la pression atmosphérique, comme étant  $-78^{\circ},5$  C.

V. Nous ne voyons que des avantages à préciser que le raccordement entre l'échelle du thermomètre à résistance de platine et celle du couple thermoélectrique est choisi au point de solidification de l'antimoine. Nous nous rallierons également volontiers à la modification proposée de la température de solidification de l'argent ( $960^{\circ},7$  au lieu de  $960^{\circ},5$ ), bien que l'écart considéré semble rester inférieur aux incertitudes actuelles dans la fixation de l'échelle en cette région; il ne paraît pas en effet que les mesures au thermomètre à gaz effectuées jusqu'ici permettent de choisir entre ces deux valeurs; mais si l'on fait appel aux raisons de continuité au voisinage du raccordement des deux échelles qu'invoque la proposition américaine, une telle décision paraît raisonnable. Il ne faut pas d'ailleurs se dissimuler que cette modification entraînera dans la région de  $800^{\circ}$  C, un écart de 0,4 degré entre l'échelle de 1927 et la nouvelle.

Par contre, la nouvelle formule d'interpolation du troisième degré contenue dans la proposition américaine ne paraît pas présenter d'avantages sur l'ancienne; elle n'introduit en effet, au voisinage de  $800^{\circ}$  C, qu'une différence de quelques centièmes de degré entre les deux échelles, différence franchement inférieure aux incertitudes de mesures; nous proposons de s'en tenir à l'ancienne formule d'interpolation.

Nous signalons enfin qu'une comparaison systématique de l'échelle internationale avec l'échelle absolue depuis  $-190^{\circ}$  jusqu'à  $1063^{\circ},0$  reste à faire. En dehors de l'intervalle  $0-100$  pour lequel un excellent travail de Hall semble avoir résolu la question, les intercomparaisons entre les deux échelles n'ont porté que sur un certain nombre de points isolés. Cela est particulièrement vrai et particulièrement important pour le domaine qui s'étend entre le point d'ébullition du soufre sous la pression atmosphérique et le point de solidification de l'or. Nous émet-

tons le vœu qu'il soit décidé d'effectuer une telle comparaison autant que possible dans plusieurs Laboratoires nationaux; en France, nous nous préparons à exécuter un tel travail et nous espérons le commencer en 1940.

VI. En ce qui concerne la valeur numérique de la constante  $C_2$ , nous considérons qu'une modification de la valeur adoptée en 1927, entraînerait plus d'inconvénients que d'avantages. Elle obligerait en particulier à changer les points fixes secondaires palladium, platine, etc., qui figurent actuellement dans les ouvrages et recueils de constantes; elle amènerait également à reprendre tous les calculs d'extrapolations optiques figurant dans les mémoires publiés depuis 1927.

On peut évidemment considérer comme fragiles les raisons qui, en 1927, ont fait adopter la valeur 1,432. Toutes les mesures optiques invoquées actuellement par le National Bureau of Standards existaient en effet à cette époque (1) et elles conduisent à la valeur moyenne 1,4364, avec toutefois une incertitude moyenne de  $\pm 0,006$ . De nombreuses tables numériques avaient été publiées antérieurement, dans lesquelles il était fait état d'une constante  $C_2$  nettement supérieure à la valeur 1,4320 (Forsythe, Skogland,  $C_2 = 1,435$ ) et l'on peut sans doute regretter qu'en 1927 l'on ait adopté la valeur 1,432, anormalement faible : ce sont certainement les nombres admis alors pour les constantes universelles ( $N, h, c, R$ ), figurant dans l'expression de  $C_2$ , qui ont influé à cette date sur le choix de cette valeur numérique. Les valeurs actuelles de ces constantes tendraient bien à faire adopter un nombre voisin de 1,4360, mais il nous paraît préférable de ne rien changer à la convention de 1927, tant que des anomalies, accessibles aux méthodes optiques, ne se seront pas révélées au cours de nouvelles mesures.

---

(1) Elles figurent dans le *Traité de Pyrométrie optique* de G. Ribaud, 1931, pp. 68 et 78.

ANNEXE T 9.

---

AMENDEMENTS ET COMMENTAIRES  
AU  
PROJET D'UNE ÉCHELLE INTERNATIONALE  
DE TEMPÉRATURE  
DE 1939,

Par M. le Prof. Dr. W. H. KEESOM

(20 mai 1939).

---

**Amendement I.**

*Annexe T 2*, p. T 69. — *b*) Depuis  $-190^{\circ}\text{C}$  jusqu'au point de fusion de la glace, la température  $t$  est donnée par :

$$t = t^* + \Delta t,$$

$t^*$  étant défini par la formule :

$$R_t = R_0 [1 + A t^* + B t^{*2} + C (t^* - 100) t^{*3}],$$

et  $\Delta t$  étant pris dans le tableau suivant :

$t^*$	$\Delta t$	$t^*$	$\Delta t$
0.....	0	-100.....	+ 0,02
- 20.....	+ 0,01	-120.....	+ 0,00
- 40.....	+ 0,02	-140.....	- 0,02
- 60.....	+ 0,03	-160.....	- 0,01
- 80.....	+ 0,04	-180.....	0,00
- 90.....	+ 0,04	-190.....	0,00

*Commentaire.* — Heuse et Otto <sup>(1)</sup>, aussi bien que Keesom et Dammers <sup>(2)</sup>, ont trouvé qu'à  $-90^{\circ}\text{C}$ , l'échelle internationale de température est environ  $0,01$  degré au-dessous de l'échelle thermodynamique. Keesom et Dammers ont comparé un groupe de thermomètres de platine au thermomètre à hélium jusqu'à  $-153^{\circ}\text{C}$ . Trois d'entre eux, qui remplissent les conditions exposées dans l'amendement II, donnent des résultats qui s'accordent bien à  $0,01$  degré près (excepté à une seule température où les résultats extrêmes diffèrent de  $0,012$  degré). L'écart moyen entre l'échelle internationale de température, telle qu'elle est donnée par ces thermomètres, et l'échelle thermodynamique, arrondi au centième de degré, est donné dans le tableau ci-dessus, afin que l'échelle internationale de 1939 soit déterminée avec assez d'exactitude pour coïncider avec l'échelle thermodynamique, l'approximation estimée étant de  $0,01$  degré.

#### Amendement II.

*Annexe T 2*, p. T 69. — Pour un thermomètre à résistance étalon le rapport  $\frac{R_{100}}{R_0}$  doit être supérieur à  $1,391$  et le rapport  $\frac{R_{111,60}}{R_0}$  supérieur à  $2,647$ .

En plus des conditions énoncées au paragraphe (a), le rapport  $\frac{R_{-182,97}}{R_0}$  doit être inférieur à  $0,247$  pour un thermomètre à résistance étalon devant être utilisé au-dessous du point de fusion de la glace.

*Commentaire.* — On ne voit pas clairement quel pourrait être l'avantage de changer la forme des conditions auxquelles le thermomètre à résistance de platine doit satisfaire. C'est pourquoi on a donné ces conditions sous la même forme qu'elles l'avaient été en 1927. On les a rendues cependant quelque peu plus sévères. Par là, l'un des thermomètres de Keesom et Dammers (Pt 69) se trouve exclu. En fait, ce thermomètre, qui satisfait

---

<sup>(1)</sup> W. HEUSE et J. OTTO, *Ann. d. Phys.*, 14, 1932, p. 181.

<sup>(2)</sup> W. H. KEESOM et B. G. DAMMERS, *Communications Kamerlingh Onnes Laboratory*, n° 239e, 1935.

aux conditions proposées par le National Bureau of Standards s'écarte des trois thermomètres mentionnés ci-dessus de quantités qui dépassent 0,01 degré.

### Amendement III.

*Annexe T2*, p. T 64. —  $T_0$  doit être pris égal à 273°,15. Dans le cas où l'on désire arrondir ce nombre, on peut choisir 273°,2.

A la page T 70, dans la formule, mettre :

273,15 au lieu de 273,16  
1336,15 au lieu de 1336,16.

*Commentaire.* — Le Professeur Kinoshita, dans une lettre datée du 18 décembre 1938, nous a informé que les auteurs japonais avaient effectué de nouvelles mesures sur la compressibilité des gaz thermométriques utilisés, et que, disent-ils, « d'après les résultats obtenus jusqu'ici,  $T_0$  est plus probablement égal à 273°,15, et non à 273°,17 comme nous avons trouvé alors. »

En combinant ce résultat avec ceux dont on peut disposer d'autre part (Mémoire du National Bureau of Standards concernant le projet de proposition, p. T 64), il semble convenable d'adopter 273,15 comme résultat moyen.

---

ANNEXE T 10.

National Physical Laboratory.

---

LE

POINT DE SOLIDIFICATION DU RHODIUM

RÉSUMÉ DES RÉCENTES RECHERCHES EXÉCUTÉES AU N. P. L.

(26 juin 1939).

---

On a déterminé le point de solidification du rhodium en mesurant, pour une certaine longueur d'onde, le rapport des brillances de corps noirs maintenus aux points de solidification du rhodium et de l'or. Le radiateur au point de solidification du rhodium avait la forme d'un tube en thorine faisant saillie dans un lingot du métal qui était lui-même contenu dans un creuset en thorine et chauffé électriquement, par induction, dans le vide.

Le dépôt d'une pellicule sur la fenêtre de l'enceinte à vide, dépôt dont le National Bureau of Standards a signalé le danger, a été presque éliminé, l'absorption supplémentaire de la fenêtre, après 60 fusions et solidifications, étant équivalente à 2 degrés seulement au point de solidification du rhodium.

Les résultats obtenus par quatre observateurs travaillant sur deux lingots sont résumés dans le tableau suivant :

*Points de fusion et de solidification du rhodium.*

Observateur.	Nombre de mesures.	Point de fusion (°C).		Nombre de mesures.	Point de solidification (°C).	
		Moyenne.	Écart moyen.		Moyenne.	Écart moyen.
A . . . . .	3	1966,0	0,4	3	1968,2	1,1
B. . . . .	1	1965,4	—	1	1964,7	—
C. . . . .	3	1965,0	0,7	3	1967,9	0,5
D . . . . .	2	1962,2	0,7	2	1964,1	2,2
A . . . . .	8	1966,0	0,5	9	1966,4	0,7
B. . . . .	7	1966,1	1,3	8	1966,3	1,4
C. . . . .	8	1965,8	0,9	7	1966,6	1,5
D . . . . .	10	1965,2	1,6	9	1962,2	0,9
	42			42		
Moyenne (1)...		1965,7			1965,9	

La pureté des échantillons était contrôlée après les expériences par la mesure du rapport  $\frac{R_{100}}{R_0}$ . Dans tous les cas on a obtenu la valeur 1,456; la valeur la plus élevée précédemment publiée avait été 1,457.

La température de solidification du rhodium,  $1966^{\circ} \pm 3^{\circ} \text{C}$ , coïncide pratiquement avec celle trouvée au National Bureau of Standards.

---

(1) Un poids double a été donné aux observations de A et B en raison du fait que toutes les lectures au point de solidification de l'or ont été faites par ces observateurs.

ANNEXE T 11.

---

NOTE

SUR

LA CALORIE, UNITÉ DE CHALEUR

Par M. le Prof. D<sup>r</sup> W. H. KEESOM,

Directeur du Kamerlingh-Onnes Laboratorium.

Président du Comité consultatif de Thermométrie.

---

1. *Historique.* — Il est difficile de préciser qui a le premier nettement introduit la conception d'une unité de chaleur <sup>(1)</sup>.

D'une manière plus ou moins implicite, elle est contenue dans le résultat obtenu par Black [1], quand il exprime la chaleur de vaporisation de l'eau en fonction de la masse d'eau qui, en consommant la même quantité de chaleur, serait échauffée de 1 degré.

On trouve chez Carnot [2] l'unité de chaleur définie comme « la quantité nécessaire pour élever de 1 degré 1 kilogramme d'eau <sup>(2)</sup> ».

Il n'est pas facile non plus de préciser quand le nom de *calorie* a été introduit, et par qui. Nous signalons que Robert Mayer [3], en traitant de la chaleur de combinaison chimique, affirme que l'on est accoutumé de déterminer cette chaleur en indiquant combien de kilogrammes d'eau peuvent être échauffés d'un degré de l'échelle centigrade par le processus chimique; « on appelle », dit alors Mayer, « unité de chaleur, *calorie*, la quantité de chaleur par laquelle la température de 1 kilogramme d'eau est élevée de 1 degré ». Favre et Silbermann [4] affirment : « Nous

---

<sup>(1)</sup> Voir les références à la fin de cette Note.

<sup>(2)</sup> CARNOT fait usage de l'échelle centigrade.

répétons que l'unité que nous avons adoptée est celle adoptée par tous les physiciens, c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 gramme d'eau de 1 degré, et que l'on appelle *unité de chaleur* ou *calorie*. »

La définition de la calorie, comme chaleur nécessaire pour échauffer 1 gramme d'eau de 1 degré C était incomplète tant que la température initiale (ou moyenne) de l'eau n'était pas fixée et que l'on n'avait pas indiqué nettement l'échelle thermométrique qui sert de base pour la lecture de l'élévation de température. A cet égard, la situation vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle était encore loin d'être satisfaisante. En 1895, Griffiths [5] attire l'attention de la British Association sur ce fait. La question fut transmise au Committee on Electrical Standards qui, en 1896, remit un rapport. Dans ce rapport [6] les propositions suivantes sont émises, dans le but d'ouvrir une discussion internationale sur cette question :

PROPOSITION I. — « Pour beaucoup de buts, la chaleur est  
« le plus commodément mesurée en unités d'énergie, et  
« l'unité C. G. S. théorique de chaleur est 1 erg. Le nom de  
« Joule a été donné par l'Electrical Standards Committee  
« à  $10^7$  ergs.

« Pour beaucoup de buts pratiques, on continuera à mesurer  
« la chaleur en fonction de la chaleur nécessaire pour élever  
« d'un certain intervalle de température la température d'une  
« masse déterminée d'eau.

« Si la masse d'eau est 1 gramme et l'intervalle de tempé-  
« rature 1 degré C du thermomètre à hydrogène de  $9^{\circ},5$  C  
« à  $10^{\circ},5$  C de l'échelle de ce thermomètre, d'après les meilleures  
« des déterminations existantes, la quantité de chaleur nécessaire  
« est 4,2 joules.

« Il sera donc opportun d'accepter ce nombre de joules comme  
« unité secondaire de chaleur.

« Cette unité thermique secondaire peut être appelée une  
« *calorie*. »

« Une deuxième proposition est pour le temps présent :

PROPOSITION II. — « La quantité de chaleur nécessaire pour  
« élever de 1 degré C de l'échelle du thermomètre à hydro-  
« gène la température de 1 gramme d'eau à une température

« moyenne, qui peut être prise comme 10 degré C de ce thermomètre, est de 4,2 joules.

« Si les recherches futures montraient que l'assertion II n'est pas exacte, la définition pourrait être ajustée par un petit changement de la température moyenne à laquelle l'échauffement de 1 degré a lieu. La définition en I et le nombre (4,2) de joules dans une calorie ne changeraient pas. »

Warburg<sup>1</sup> [7], dans un rapport adressé à la session commune des Sections de physique et de mathématique et physique appliquées, tenue en septembre 1899 à la Naturforscherversammlung à Munich, recommande que, tout en maintenant l'erg comme unité théorique, l'on définisse comme unité pratique de chaleur la quantité de chaleur qui échauffe 1 gramme d'eau de 14°,5 à 15°,5 dans l'échelle du thermomètre à hydrogène (1).

La loi allemande du 7 août 1924 [11] décréta : « Les unités légales pour la mesure de quantités de chaleur sont la kilocalorie (kcal.) et le kilowattheure (kWh.). La kilocalorie est la quantité de chaleur par laquelle 1 kilogramme d'eau à la pression de 1 atmosphère est échauffé de 14°,5 à 15°,5. Le kilowattheure est équivalent à 1000 fois la quantité de chaleur qu'un courant continu de 1 ampère légal développe pendant 1 heure dans une résistance de 1 ohm légal, et peut être considéré comme égal à 860 kilocalories. »

L'échelle thermométrique est définie comme suit :

« L'échelle thermométrique légale est l'échelle thermodynamique, étant entendu que la température normale de fusion de la glace est désignée par 0° et la température normale d'ébullition de l'eau par 100°. »

En 1929, l'« International Steam-Table Conference », réunie à Londres sous la présidence de Sir Richard Glazebrook, décida [12] de baser ses tables sur une unité thermique (la kilocalorie internationale) équivalant à  $\frac{1}{860}$  kWh international. La

---

(1) Cette unité fut déjà proposée par exemple par E. H. Griffiths [5] et par Bartoli [8], et employée par exemple par E. H. Griffiths [9] et par A. Bartoli et E. Stracciati [10].

Conférence considérait qu'il est désirable que l'unité adoptée soit telle que toute complication due à la variation de l'accélération de la pesanteur dans différentes parties du monde, ou à la variation de la chaleur spécifique de l'eau avec la température, soit éliminée; et qu'il serait aussi désirable d'éviter une définition qui nécessiterait un changement dans la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur lors de chaque progrès de la technique calorimétrique. On observait que les unités électriques sont indépendantes de  $g$  et de  $J$ , qu'elles sont connues exactement dans des limites très serrées et adoptées internationalement, et qu'il serait donc très désirable de tâcher d'obtenir qu'une calorie définie en fonction du wattheure soit adoptée universellement. Cette unité, la kilocalorie, ne devrait pas être très différente des unités thermiques en usage jusqu'à cette date, et devrait être dérivée d'une unité électrique au moyen d'un facteur de conversion facile à retenir.

La troisième « International Steam-Table Conference », tenue en 1934 à Washington, Cambridge, Mass. et New-York [13], désigne la millième partie de la kilocalorie définie comme nous venons de le rapporter comme « international steam table calorie » ou I. T. cal.

En 1931, l'Union internationale de Physique pure et appliquée prend en mains la question de la définition de la calorie sur la proposition de F. W. Aston, Président du Comité britannique de Physique. La question est remise à la Commission des Unités présidée par Sir Richard Glazebrook. Cette Commission présenta, en 1934, un rapport, dont les recommandations, adoptées par l'Assemblée générale, étaient conçues comme suit [14] :

« La Commission recommande :

« *a.* Que, dans les mesures de quantités de chaleur faites en unités mécaniques, l'unité choisie soit le joule, défini comme équivalent à  $10^7$  ergs;

« *b.* Que l'on entende par calorie-gramme la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1 gramme d'eau purgé d'air de  $14^{\circ},5$  à  $15^{\circ},5$  de l'Echelle internationale de température, sous la pression d'une atmosphère normale. »

Le rapport ajoute l'observation suivante : « La valeur la plus probable de la calorie-gramme paraît être 4,186 joules. La

« valeur la plus probable du watt-seconde *international* paraît « être 1,0003 joule.

Ces valeurs sont en accord avec la décision prise en 1929, par « l'International Steam-Table Conference », d'adopter comme « unité la kilocalorie équivalant à  $\frac{1}{860}$  kWh international. »

2. *Proposition concernant la définition de la calorie.* — La question de l'unité de chaleur a été soumise à l'attention du Comité international des Poids et Mesures par une lettre du Professeur J. Stark, Président de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, du 16 novembre 1937. Le Comité international a renvoyé la question pour discussion et avis au Comité consultatif de Thermométrie. D'un échange de vues entre M. Stark, M. Pérard et l'auteur de cette Note, il est résulté la proposition ci-dessous, qui est soumise à la délibération du Comité consultatif.

Le Comité consultatif de Thermométrie pourrait proposer comme définition de la calorie le texte suivant :

« La calorie est équivalente à  $\frac{3600}{860}$  joules ou  $\frac{1}{860}$  wattheure. »

Les motifs qui ont mené au choix de la définition proposée sont résumés comme suit :

Comme la chaleur n'est autre chose qu'une forme spéciale d'énergie, on pourrait être d'avis que la définition d'une unité de chaleur est au moins superflue. Dans cet ordre d'idées, l'unité de chaleur est nécessairement identique à l'unité d'énergie, c'est-à-dire l'erg <sup>(1)</sup>. Or cette unité d'énergie est par son origine une unité mécanique, et s'il est vrai que la chaleur et l'énergie mécanique sont de nature identique, il n'en reste pas moins que les apparences de ces deux formes d'énergie sont tout à fait différentes. Mesurer en unités mécaniques une quantité de chaleur définie par son effet d'ordre thermique, comme l'échauffement d'un certain corps d'une température à une autre, reste toujours une manipulation délicate. Ce fait a eu pour conséquence que, dans l'histoire de la Physique, on a introduit une unité spéciale de chaleur, et que jusqu'à ce jour on a continué de rapporter les

---

(1) Déjà Rankine [15] dans sa théorie des machines thermodynamiques exprimait les quantités de chaleur en unités mécaniques.

quantités de chaleur, en particulier lorsqu'elles se manifestent par leurs effets thermiques, à cette unité spéciale de chaleur, la calorie.

Il paraît inopportun d'abandonner en ce moment la calorie. D'autre part, maintenant qu'il est possible de rapporter, en particulier par l'intermédiaire de mesures électriques, une quantité de chaleur définie par son effet thermique à l'unité mécanique d'énergie, avec une précision qui est en général au moins aussi grande que la précision des mesures thermiques elles-mêmes, il semble indiqué de lier d'une manière fixe la calorie à l'unité mécanique, l'erg, ou à son multiple, le joule. Ceci est d'autant plus opportun maintenant qu'à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1940 les unités électriques seront rapportées aux unités mécaniques.

Si l'on excepte la décision prise par l'« International Steam-Table Conference » (*voir* paragraphe 1), la calorie était jusqu'ici liée à une substance particulière qui est l'eau. Alors même qu'il est bien entendu qu'on ne considère que le mélange isotopique normal, il faut préciser que l'eau doit se trouver purgée d'air et sous la pression d'une atmosphère normale. On a fixé la calorie comme étant la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer l'unité de masse d'eau de 14<sup>o</sup>,5 à 15<sup>o</sup>,5 de l'échelle internationale (1). Quoiqu'ainsi tout arbitraire soit bien écarté, il faut avouer que toutes ces complications disparaissent si la calorie est rapportée à l'unité mécanique. On n'a alors ni à considérer les propriétés particulières d'une substance déterminée, ni à fixer des conditions spéciales supplémentaires. Un autre avantage est que la calorie ne nécessite plus de mesures particulières compliquées pour être mise en relation avec l'unité d'énergie mécanique, puisqu'elle quitte la série des unités physiques fondamentales autonomes.

Enfin, il faut faire ressortir que, dans ces derniers temps, toutes les mesures précises de quantités de chaleur ont été effectuées par des méthodes électriques, donc rapportées à des unités qui, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1940, seront elles-mêmes directement liées aux unités mécaniques; en conséquence, il faut, dans chaque cas, entreprendre le calcul de conversion des unités électriques

---

(1) La calorie de 0 à 1<sup>o</sup> C (calorie de Regnault) et la calorie moyenne de 0 à 100<sup>o</sup> C (calorie de Bunsen) ont été aussi employées par certains expérimentateurs.

ou mécaniques en unités de chaleur. Mais ce calcul restera incertain, tant que le facteur de conversion ne sera pas fixé internationalement.

Toutes ces considérations mènent à la conclusion qu'il est indiqué de définir la calorie comme un certain multiple de l'erg ou du joule.

En choisissant le facteur

$$\frac{3600}{860} \cong 4,18605$$

adopté par la Première « International Steam-Table Conference » (§ 1), on est certain que la calorie définie ainsi est pratiquement identique (*voir* § 3) à la calorie ancienne dite « à 15° C ».

On pourrait se demander s'il ne serait pas recommandable de distinguer la nouvelle calorie par un qualificatif approprié, par exemple calorie « absolue ». Considérant que les unités électriques qui seront en vigueur à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1940 ne comporteront plus un tel adjectif, il paraît indiqué que la calorie, qui se range dans le même système, n'en comporte pas non plus.

A la définition

$$1 \text{ calorie} = \frac{1}{860} \text{ wattheure,}$$

correspond

$$1 \text{ kilocalorie} = \frac{1}{860} \text{ kilowattheure.}$$

Dans ces termes, la définition donnée ici coïncide formellement avec celle qui a servi de base aux Tables internationales schématiques pour l'eau et la vapeur d'eau [12]. Cependant, celles-ci se rapportaient au kilowattheure dit international, et la Troisième « International Steam-Table Conference » (§ 1) l'a désignée comme calorie internationale pour les Tables de la vapeur d'eau (« international Steam-Table calorie », I. T. cal.) [13].

3. *Rapport entre la calorie et l'ancienne calorie définie en fonction de la capacité calorifique de l'eau.* — La discussion des anciennes déterminations de l'équivalent mécanique de l'unité de chaleur définie en fonction de la capacité calorifique de l'eau est rendue extrêmement difficile à cause des incertitudes qui existaient autrefois concernant l'échelle thermométrique

d'une part, et, si la chaleur était mesurée par des moyens électriques, des incertitudes concernant les unités électriques d'autre part. Pour les anciennes déterminations nous renvoyons le lecteur aux aperçus existant [16]; car nous ne considérons dans le résumé ci-dessous que les recherches d'une date plus récente.

a. Jaeger et von Steinwehr [17] déduisent de leurs mesures :

$$1 \text{ cal}_{15} = 4,184_2 \text{ joules internationaux.}$$

Si nous adoptons [18]

$$1 \text{ ohm international moyen} = 1,00048 \text{ ohm absolu}$$

et

$$1 \text{ volt international moyen} = 1,00036 \text{ volt absolu,}$$

nous déduisons :

$$1 \text{ joule international moyen} = 1,00024 \text{ joule absolu } (1).$$

Il s'ensuit que, d'après Jaeger et von Steinwehr,

$$1 \text{ cal}_{15} = 4,185_2 \text{ joules absolus.}$$

Comme (§ 2)  $1 \text{ cal} = 4,18605 \text{ joules absolus}$ , nous obtenons :

$$\frac{1 \text{ cal}}{1 \text{ cal}_{15}} = 1,00020.$$

b. Laby et Hercus [19] mesuraient la capacité calorifique de l'eau directement en ergs. Ils ont obtenu

$$1 \text{ cal}_{15} = 4,1852_6 \times 10^7 \text{ ergs.}$$

Donc

$$\frac{1 \text{ cal}}{1 \text{ cal}_{15}} = 1,0001_9.$$

c. Osborne, Stimson et Fiock [20] donnent entre autres résultats de leurs mesures les enthalpies de l'eau liquide sous la pression de sa vapeur saturée de 10 en 10°. L'interprétation de ces résultats pour le point qui nous intéresse est un peu déli-

---

(1) Les valeurs nationales (comp. réf. 17, p. 112, 113) n'en diffèrent que de quelques unités de la dernière décimale.

cate. En effet du Tableau XIII de leur Mémoire on tire pour la différence des enthalpies aux températures 20 et 10° C : 41,81 joules internationaux. Mais la comparaison avec le Tableau XII montre que le terme principal de cette valeur dépend d'une formule d'interpolation, tandis que la mesure directe avait donné 0,02 joule de plus. Prenons, en conformité avec la mesure directe, cette différence égale à 41,83 joules internationaux. On en déduit  $\frac{dW}{dt} = 4,183$  à 15° C (W = enthalpie). Cette quantité n'est pas rigoureusement égale à  $c_p$ ; mais un petit calcul montre que la différence peut être négligée. On trouve donc

$$\begin{aligned} 1 \text{ cal}_{15} &= 4,183 \text{ joules internationaux} \\ &= 4,184 \text{ joules absolus,} \end{aligned}$$

donc

$$\frac{1 \text{ cal}}{1 \text{ cal}_{15}} = 1,0005.$$

En récapitulant, nous avons la liste suivante :

	cal/cal <sub>15</sub> .
Jaeger et von Steinwehr.....	1,0002
Laby et Hercus.....	1,0002
Osborne, Stimson et Fiock.....	1,0005

La moyenne donne 1 cal = 1,0003 cal<sub>15</sub>, tandis que, considérant les différentes sources d'incertitude, il semble prudent d'admettre une erreur moyenne égale à ± 0,0003, donc

$$1 \text{ cal} = 1,0003 \pm 0,0003 \text{ cal}_{15} \quad (1).$$

(<sup>1</sup>) N. S. Osborne, H. F. Stimson et D. C. Ginnings (*J. of Research of the N. B. of S.*, août 1939, t. 23, p. 197), trouvent 1 cal<sub>15</sub> = 4,1850 joules internationaux, ce qui donne avec 1 joule international = 1,00024 joule absolu : 1 cal<sub>15</sub> = 4,1860 joules absolus, d'où  $\frac{1 \text{ cal}}{1 \text{ cal}_{15}} = 1,0001$ . En remplaçant le nombre du texte provenant du N. B. S. par celui-ci, la moyenne devient : 1 cal = 1,0001 cal<sub>15</sub>.

A la suite des modifications introduites par le dernier Comité consultatif d'Électricité dans les valeurs des unités internationales, le joule international se trouverait maintenant égal à 1,00030 joule absolu. La nouvelle calorie serait alors encore un peu plus voisine de la calorie à 15°. Toutefois le chiffre arrondi 1,001 ne change pas. [Notes ajoutées à l'impression.]

4. *Conclusion.* — Le Comité consultatif de Thermométrie pourrait prendre, comme base de discussion, la proposition et la remarque suivantes à soumettre à la décision du Comité international des Poids et Mesures.

PROPOSITION.

*L'unité de quantité de chaleur est la calorie. La calorie est équivalente à  $\frac{3600}{860}$  joules ou  $\frac{1}{860}$  wattheure.*

REMARQUE.

*La calorie est égale à  $1,0003 \pm 0,0003$  fois l'ancienne calorie dite à 15° C.*

RÉFÉRENCES.

1. BLACK, *Lectures on Natural Philosophy*, t. 1, 1760-1765, pp. 79 et 504. Cité d'après E. HOPPE, *Geschichte der Physik*, Braunschweig, 1926, p. 192.
2. S. CARNOT, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris, 1824, p. 45. Cité d'après la réimpression de 1878. Voir aussi OSTWALD'S, *Klassiker*, n° 37, p. 47.
3. J. R. MAYER, *Beiträge zur Dynamik des Himmels*. Heilbronn, 1848. Cité d'après *Die Mechanik der Wärme in gesammelten Schriften* von J. R. MAYER, Stuttgart, 1867, p. 152.
4. P. A. FAVRE et J. T. SILBERMANN, *Ann. de Chimie et de Physique*, t. 34, 1852, p. 385.
5. E. H. GRIFFITHS, *Phil. Mag.*, t. 40, 1895, p. 431.
6. *Brit. Ass. Rep.*, 1896, p. 150.
7. E. WARBURG, *Referat über die Wärmeeinheit*. Leipzig, 1900.
8. A. BARTOLI, *Nuovo Cimento*, t. 3, 1836, p. 84.
9. E. H. GRIFFITHS, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, t. 186, 1895, p. 261.
10. A. BARTOLI et E. STRACCIATI, *Rend. Lomb.*, t. 28, 1895, p. 469.
11. *Z. Instrum-kde*, t. 45, 1924, p. 475.
12. *The Engineer*. London, t. 148, 1923, p. 601; *Mechanical Engineering*, New-York, t. 52, 1930, p. 120.
13. *The Engineer*, London, t. 160, 1935, p. 352.

14. Congrès international de Physique organisé par l'Union internationale de Physique et la Physical Society. *Actualités scientifiques et industrielles*, n° 342. Paris, Hermann et C<sup>ie</sup>, 1936. *International Conference on Physics*, London, 1934. *Reports on Symbols, Units and Nomenclature*. Published by the *Physical Society*, London, 1935.
15. W. J. M. RANKINE, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, t. 144, 1854, p. 115.
16. MÜLLER-POUILLET, *Lehrbuch der Physik*, t. III, 1926, p. 118; A. EUCKEN, *Energie-und Wärmeinhalt. Handbuch der Experimentalphysik*. Leipzig, 1929; T. H. LABY, *Proc. Phys. Soc.*, London, t. 38, 1926, p. 169. Voir aussi T. H. LABY et E. O. HERCUS, *Int. Crit. Tables*, V, p. 78; R. T. BIRGE, *Rev. Mod. Phys.*, t. 1, 1929, p. 1.
17. W. JAEGER und H. von STEINWEHR, *Ann. Physik*, t. 64, 1921, p. 305.
18. Comité international des Poids et Mesures, *Procès-Verbaux des séances*, 2<sup>e</sup> série, t. 18, 1937, p. 111.
19. T. H. LABY and E. O. HERCUS, *Proc. Phys. Soc. London*, t. 47 1935, p. 1003.
20. N. L. OSBORNE, H. F. STIMSON and E. F. FLOCK, *Bur. Stand. J. Res.*, t. 5, 1930, p. 411.



ANNEXE T12.

Institut de Métrologie de l'U. R. S. S.

---

LA CALORIE 20°

ET

SON RAPPORT A L'UNITÉ ABSOLUE.

Par M. S. W. LIPINE.

---

(Ce Mémoire a paru dans les publications de l'Institut de Métrologie de l'U. R. S. S. La conclusion en est résumée dans les propositions suivantes.)

---

1. L'unité principale de chaleur est le joule égal à  $10^7$  ergs.
  2. L'unité secondaire pratique est la calorie 20° à laquelle on attribue provisoirement la valeur de  $4,1807 \cdot 10^7$  ergs.
  3. Pour définir la valeur exacte de la calorie 20°, il est nécessaire d'effectuer une nouvelle détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur avec une précision correspondant à l'état actuel de la métrologie.
-

ANNEXE T 13.

National Bureau of Standards.

---

MÉ MORANDUM

SUR

LA DÉFINITION DE L'UNITÉ DE CHALEUR

(13 avril 1939).

---

A la date du 6 mars, le Professeur W. H. Keesom, Président du Comité consultatif de Thermométrie, informait les membres de ce Comité que le Comité international des Poids et Mesures avait renvoyé la question de la définition de l'unité de chaleur au Comité consultatif de Thermométrie.

Comme base de discussion, le Professeur Keesom soumettait une proposition, formulée par le Professeur J. Stark, Président de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, qui ferait de la calorie l'unité de chaleur, et qui la définirait non pas par rapport aux propriétés de l'eau, mais par rapport au joule. La calorie ainsi définie ne serait pas désignée par un terme spécial mais simplement sous le nom de calorie. La proposition et la remarque explicative étaient formulées de la façon suivante :

*Proposition.* — « L'unité de chaleur est la calorie. La calorie est équivalente à  $\frac{3600}{860}$  joules ou  $\frac{1}{860}$  watt-heure ».

*Remarque.* — « La calorie est  $1,0002 \pm 0,0003$  fois l'ancienne « calorie communément appelée calorie à 15° ».

Une Note explicative jointe à la proposition passe en revue brièvement les faits essentiels concernant les unités d'énergie et de chaleur, et résume les arguments en faveur de la proposition.

Il n'y a pas lieu de discuter à nouveau ces faits en détail. En ce qui concerne le choix de l'unité de chaleur, le point peut-être le plus important mis en évidence dans la Note est que presque toutes les mesures modernes précises de quantité de chaleur ont été faites par des méthodes électriques et par suite, après le 1<sup>er</sup> janvier 1940, de telles mesures seront faites directement par rapport à des unités mécaniques d'énergie. Il est même possible d'aller plus loin et d'ajouter qu'on utilise de plus en plus le joule comme unité pratique de chaleur, et que les désavantages de l'opération supplémentaire, qui consiste à diviser les résultats, mesurés en joules, par un nombre arbitrairement choisi, compris entre 4,18 et 4,19, deviennent de plus en plus évidents. Il est à peine nécessaire de montrer les avantages qu'il y a à utiliser le joule comme unité, plutôt qu'une unité qui serait 4,186 joules par exemple. Cette dernière unité convient dans le cas spécial de calculs approchés ayant rapport à la capacité calorifique de l'eau liquide aux températures ordinaires; mais elle n'a aucun avantage sur le joule dans les autres cas.

On peut admettre que le but poursuivi en soumettant cette proposition était l'adoption internationale d'une calorie qui serait acceptable d'une façon générale par ceux qui utilisent la calorie. Il se trouve qu'un grand nombre des groupements qui ont eu l'occasion d'utiliser une calorie définie sont représentés au National Bureau of Standards. Il apparaît qu'aucune valeur unifiée ne serait acceptée par tous ces groupements, bien que ceux-ci soient d'accord pour considérer le joule comme une unité satisfaisante. Par conséquent il paraît probable que si la Conférence générale des Poids et Mesures devait adopter une proposition analogue à celle qui lui est soumise, la définition ne serait pas acceptée d'une façon universelle et le résultat serait qu'on ajouterait encore une unité de plus à celles qui sont déjà en usage. Ceci ne ferait qu'augmenter la confusion de la situation actuelle.

D'autre part, si la définition soumise à l'approbation de la Conférence générale était adoptée par tous les usagers de la calorie, celle-ci prendrait un nouvel essor. Il en résulterait que, pendant plus longtemps encore qu'il n'en serait sans cela, la calorie continuerait à être utilisée pour des applications où le joule est beaucoup plus commode. Pourtant l'évolution favorisant le remplacement de la calorie par le joule comme unité pratique de chaleur est déjà en bonne voie, et ne devrait pas être contre-carrée, mais encouragée.

Par conséquent, il semble que si la proposition soumise était adoptée, et si l'on remplaçait effectivement toutes les calories existantes par une seule, on retarderait sans nécessité l'adoption générale du joule comme unité pratique de chaleur. D'autre part, si l'adoption de la proposition n'avait pour conséquence que d'ajouter une calorie de plus à celles qui sont déjà en usage, on encouragerait la tendance à utiliser directement le joule. Ainsi, en échouant dans cette entreprise, on arriverait indirectement à un résultat souhaitable; mais ce résultat peut être acquis d'une façon beaucoup plus effective par des méthodes plus directes.

*Conclusion.* — La Conférence générale des Poids et Mesures pourrait rendre un service utile en affirmant que le joule, unité pratique d'énergie, est aussi l'unité de chaleur la plus indiquée, et en recommandant que si l'on avait parfois à utiliser des unités de chaleur secondaires, telles que la *calorie* ou la *British Thermal Unit*, celles-ci soient définies explicitement en fonction du joule.

---

(Un second Mémoire, intitulé « Mémoire sur des changements d'unités d'énergie », préparé en vue de la Conférence internationale des Tables de la Vapeur d'Eau, accompagnait celui-ci).



---

## TABLE DES MATIÈRES.

---

	Pages.
Liste des Membres du Comité consultatif de Thermométrie.....	T 3
<b>Procès-verbal de la première séance, mardi 11 juillet 1939.....</b>	<b>T 5-T 18</b>
Bienvenue aux Membres du Comité consultatif de Thermométrie.....	T 5
Élection du Secrétaire et du Rapporteur.....	6
Nomination de trois spécialistes comme membres du Comité consultatif.....	6
Thermométrie des basses températures (Position du point de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin. — Adoption de la Résolution s'y rapportant).....	7
Échelle thermométrique au-dessous de $-190^{\circ}\text{C}.$	9
Proposition concernant la définition de l'échelle thermodynamique absolue.....	10
L'Échelle internationale de Température (Projet établi par le N. B. S.). Discussion de la 2 <sup>e</sup> partie : Définition de l'Échelle.....	12
Points fixes fondamentaux et points fixes primaires,	12
Intervalle compris entre le point de fusion de la glace et le point de solidification de l'antimoine.,	13
Intervalle compris entre $-190^{\circ}\text{C}$ et le point de fusion de la glace.....	15
Intervalle compris entre le point de solidification de l'antimoine et le point de solidification de l'or ...	16
Températures situées au-dessus du point de solidification de l'or (Constante $C_4$ ).....	17

	Pages.
<b>Procès-verbal de la deuxième séance, mercredi 12 juillet 1939.</b> .....	T 19-T 32
<b>L'Échelle internationale de Température. Discussion de la 3<sup>e</sup> partie : Modes opératoires recommandés et renseignements complémentaires.</b> ...	T 19
Point de fusion de la glace.....	20
Point d'ébullition de l'eau.....	21
Températures situées au-dessus du point de solidification de l'or.....	23
Relation entre l'échelle Kelvin et l'échelle internationale de température.....	23
Points secondaires.....	23
<b>Emploi de la lettre <i>t</i> pour désigner la température.</b> .....	25
<b>M. Pérard est chargé d'harmoniser, avec les décisions prises, la 1<sup>re</sup> partie du Projet : Introduction</b> .....	25
<b>L'unité de chaleur.</b> .....	26
Résolution concernant la définition de l'unité de chaleur.....	31
Prochaine session.....	32
Clôture de la session.....	32
<b>Premier Rapport du Comité consultatif de Thermométrie au Comité international des Poids et Mesures; par M. J. E. Sears.</b> .....	T 33-T 24
<b>Annexes des Procès-Verbaux du Comité consultatif de Thermométrie</b> .....	T 55-T 142
T 1. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. — <i>Proposition relative à la définition de l'échelle thermodynamique absolue</i> .....	55
T 2. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. — <i>Projet d'une échelle internationale de température de 1939.</i> .....	60
Mémoire sur le projet de rédaction.....	61
Projet de rédaction de l'échelle internationale de température de 1939 :	

	Pages.
Première Partie : Introduction.....	T 66
Deuxième Partie : Définition de l'échelle internationale de température de 1939.....	68
Troisième Partie : Modes opératoires recommandés et renseignements complémentaires.....	70
T 3. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. — <i>Données détaillées concernant l'échelle de tempé- rature dans le domaine défini au moyen du couple thermoélectrique.....</i>	80
T 4. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. — <i>L'échelle internationale des températures et quelques constantes physiques s'y rap- portant; par M. H.-T. Wensel.....</i>	88
T 5. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. — <i>Com- mentaires sur le projet d'une échelle internationale de température de 1939, présenté par le National Bureau of Standards.....</i>	89
T 6. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. — <i>Re- marques sur le Mémoire de H.-T. Wensel « L'échelle internationale de température et quelques constantes physiques s'y rapportant ».....</i>	93
T 7. PHYSIKALISGH-TECHNISCHE REICHSANSTALT. — <i>Réponse aux propositions du National Bureau of Standards sur une modifi- cation de l'échelle internationale de température.....</i>	98
T 8. DÉLÉGATION FRANÇAISE. — <i>Remarques rela- tives au projet de modification de la convention provisoire sur l'échelle inter- nationale des températures; présentées par MM. G. Ribaud et G. Boutry.....</i>	101
T 9. <i>Amendements et commentaires au projet d'une échelle internationale de tempé- rature de 1939, par M. W. H. Keesom.</i>	105
T 10. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. — <i>Le point de solidification du rhodium. Résumé des récentes recherches exé- cutées au N.P.L.....</i>	108

	<u>Pages.</u>
T 11 <i>Note sur la calorie, unité de chaleur</i> ; par M. W. H. Keesom, .....	T 110
T 12 INSTITUT DE MÉTROLOGIE DE L'U. R. S. S. — <i>La calorie 20° et son rapport à l'unité absolue</i> .....	121
T 13 NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. — <i>Mémo- randum sur la définition de l'unité de chaleur</i> .....	122
TABLE DES MATIÈRES .....	125

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.